



**TİTREŞİMLE GERİLME GİDERME YÖNTEMİNİN KAYNAKLI
BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Sinem KAÇAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2017

Sinem KAÇAR tarafından hazırlanan “TİTREŞİMLE GERİLME GİDERME YÖNTEMİNİN KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Ulaş YAMAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 29/12/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sinem KAÇAR

29/12/2017

TİTREŞİMLE GERİLME GİDERME YÖNTEMİNİN KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Sinem KAÇAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2017

ÖZET

Kaynakla birleştirilen parçalar işlem esnasında sıcaklık değişimlerine maruz kalırlar. Isı etkisinin şiddetine, malzemelerin mekanik özelliklerine ve bağlantı biçimine bağlı olarak ısınan malzemelerin genleşmesi, çevresindeki ısınmamış bölge tarafından engellenir. Bu engelleme sonucunda malzemelerde artık gerilmeler ve kalıcı şekil değişimleri oluşur. Yapı içerisindeki artık gerilmeler yorulma ömrünün kısılmasına ve çarpılma hasarlarına sebep olurlar. Performansının ve dayanımının uzun olması istenen ağır ve değişken yükler altında çalışan kaynaklı yapılarda, yorulma dayanımının belirlenmesi ve artık gerilmeleri azaltarak yorulma ömrünün artırılması amacıyla literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Kaynaklı yapılarda dayanımın artırılması için, kaynak öncesi ve/veya kaynak sonrası çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise kaynaklı parçalarda bulunan artık gerilmeleri mekanik titreşimler uygulayarak gideren titreşimle gerilme giderme (TGG) yöntemi incelenmiştir. Bu metot, az enerji sarfıyatı sağlaması, maliyetleri azaltması, verimliliği, mekanik dayanımı artırması ve daha az hava kirliliğine neden olduğundan son yarım yüzyılda sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında; sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan DIN17100 (st52-3) malzemesi ile kaynak sonrasında TGG uygulanan ve gerilme gidermesiz numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. İki farklı parametre için öncelikle çekme deneyleri, daha sonra Brinell metoduyla sertlik ölçümleri yapılmış olup TGG sonrası bu deney sonuçlarında artış meydana gelmiş ve plakanın mukavemeti artmıştır. Kalıntı gerilmelerin yorulma ömrüne etkisini incelemek için Manyetik Barkhausen Yöntemi ile kaynaklı plakaların TGG sonrası ön ve arka yüzündeki kalıntı gerilme değişimleri incelenmiş ve hem ön hem de arka yüzeyde kalıntı gerilmelerde azalma gerçekleştiği görülmüştür. Son olarak, üç nokta yorulma deneyleri yapılarak kaynaktan sonra uygulanan TGG yönteminin yorulma ömrüne etkisi araştırılmıştır. TGG uygulanan numunelerin yorulma dayanımlarının yaklaşık üç kat arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91415

Anahtar Kelimeler : Titreşimle gerilme giderme, kaynaklı bağlantı, yorulma ömrü, kalıntı gerilme giderme

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VIBRATION STRESS RELIEF METHOD ON THE FATIGUE LIFE OF WELDED JOINTS

(M. Sc. Thesis)

Sinem KAÇAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2017

ABSTRACT

Welded parts are faced heating and cooling cycles during the joining process. The expansion of the heated parts during welding is restricted by the surrounding materials depending on the intensity of heat effect, mechanical properties of those materials and the geometry of assembly. Residual stress and plastic deformations occur due to these restrictions. Residual stresses lead to decrease fatigue life and rise distortional failure. Various methods are applied before welding and / or after welding to increase the strength in welded structures. In this study, Vibration Stress Relief (VSR) method, which promises to reduce residual stresses in welded parts with applying mechanical vibrations was investigated. This method has been frequently used in the past half century because of lower consumed energy, lower cost, efficiency, no damage and less pollution. In this study, mechanical properties' differences were compared between vibration stress relief welded parts and non-stress relief welded parts which were DIN17100 (St52-3) material, widely used in the industry. Firstly, tensile tests were carried out and then hardness measurements were accomplished according to Brinell Hardness Method. After VSR, tensile strength and hardness results have increased. To investigate the effects of residual stresses on fatigue life, residual stress changes of front and back of the welded plates were measured by Magnetic Barkhausen Method. Residual stress values on the front and the back surfaces of plate reduced according to measurement. Finally, three point fatigue tests were performed to investigate effectiveness of VSR in terms of the fatigue life. It was observed that the fatigue life increased about three times after vibration stress relieving process.

Science Code : 91415

Key Words : Vibration stress relief, welded joints, fatigue life, residual stress relief

Page Number : 75

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım, öneri, eleştirileri ve desteği ile bana rehber olan danışmanım sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a teşekkürü borç bilirim.

HİDROMEK A.Ş. ve MAN Türkiye A.Ş. firmalarına tez çalışmasında vermiş oldukları cihaz, ekipman, malzeme ve teknik desteklerden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yöneticim ve çalışma arkadaşlarıma, destekleri, önerileri ve çalışmalarım boyunca bana gösterdikleri anlayış için teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük emekleri olan, okul ve çalışma hayatım boyunca benim en büyük destekçilerim olan, bana sundukları sonsuz sevgileriyle beni mutlu eden, kıymetlilerim, annem Dilek YEŞİLCE, babam Süleyman YEŞİLCE ve kız kardeşim Merve YEŞİLCE'ye en derin teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışmalarım boyunca beni sabırla ve anlayışla destekleyen, her zaman yanımda olan, hayatımı daha anlamlı kılan sevgili eşim Atilla KAÇAR'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	3
2.1. Gazaltı Kaynağı.....	3
2.2. Kalıntı Gerilmeler.....	5
2.2.1. Kalıntı gerilmelerin oluşum nedenleri	5
2.2.2. Kaynak sonrası kalıntı gerilmeler	7
2.3. Yorulma	10
2.3.1. Yorulma mekanizması	11
2.3.1. Yorulma hesaplamaları	12
2.4. Tahribatlı ve Tahribatsız Kalıntı Gerilim Ölçüm Yöntemleri	16
2.4.1. Tahribatlı kalıntı gerilim ölçüm yöntemleri	16
2.4.2. Tahribatsız kalıntı gerilim ölçüm yöntemleri	19
2.5. Kalıntı Gerilme Giderme Yöntemleri	27
2.5.1. Isıl işlem	28
2.5.2. Titreşimle gerilme giderme	29

	Sayfa
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
3.1. Malzeme.....	45
3.2. Kaynak İşleminin Uygulanması	45
3.3. Çekme Deneyi	48
3.4. Sertlik Testi.....	49
3.5. Eğme Testi	51
3.6. Yorulma Testi	52
3.7. Manyetik Barkhausen Yöntemi ile Kalıntı Gerilme Ölçümü	52
3.8. Titreşimle Gerilme Giderme Uygulamaları.....	53
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	57
5. SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gerilme giderme yöntemlerinin karşılaştırılması	30
Çizelge 2.2. TGG Ck35 çeliğinin mekanik özelliklere etkisi	36
Çizelge 2.3. Titreşimle gerilme gidermenin Ck35 çeliğimin artık gerilmelere etkisi....	36
Çizelge 2.4. Kaynaklı plakalarda kalıntı gerilme ölçüm sonuçları.....	37
Çizelge 2.5. Periyodik yük altında artık gerilme miktarındaki değişimler	38
Çizelge 2.6. Periyodik yük altında artık gerilme miktarındaki değişimler	39
Çizelge 2.7. Çalışmalardaki deneyler ve titreşim uygulaması farklılıkları	40
Çizelge 2.8. Deneyler ve yorulma sonuçları	41
Çizelge 3.1. Deney parçasının kimyasal bileşeni	45
Çizelge 3.2. Deney parçasının mekanik özellikleri	45
Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri	45
Çizelge 4.1. Gerilme gidermesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları	58
Çizelge 4.2. TGG uygulanmış numunelerin çekme deneyi sonuçları	58
Çizelge 4.3. Yorulma deneyi nümerik sonuçları	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Gazaltı kaynağı mekanizması	3
Şekil 2.2. Mekanik yüklemelerin neden olduğu kalıntı gerilmelerin gösterim.....	6
Şekil 2.3. Isı tesiri altındaki bölge	8
Şekil 2.4. Kaynaklı birleştirmede kalıntı gerilme dağılımı.....	8
Şekil 2.5. Kaynaklı yapıdaki sıcaklık ve kalıntı gerilme dağılımı.	9
Şekil 2.6. Yorulma çatlağı evreleri	10
Şekil 2.7. Yorulma mekanizması.....	11
Şekil 2.8. Genel kaynak hataları	12
Şekil 2.9. Değişken yükleme durumu	12
Şekil 2.10. Gerilme genliği-ömür grafiği.....	14
Şekil 2.11. Rozet birim deformasyon ölçerin (strain gage) şematik görünümü	17
Şekil 2.12. Halka çekirdek yöntemi.....	18
Şekil 2.13. Kanal açma yöntemi	18
Şekil 2.14. Tüp Yarma yöntemi.....	19
Şekil 2.15. Bir konsol kirişte oluşabilecek kuvvet çizgileri.....	20
Şekil 2.16. Geleneksel X-ışını yöntemi	21
Şekil 2.17. Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller	22
Şekil 2.18. MBG yöntemi ile kaynaklı plakadan kalıntı gerilme ölçümleri	23
Şekil 2.19. MBG yöntemi ile kaynaklı plakadan kalıntı gerilme ölçümleri	24
Şekil 2.20. Kaynaklı plakalarda XRD ile MBG yönteminin karşılaştırılması.....	24
Şekil 2.21. MBG Yöntemi tekniği ve delik delme yöntemi sonuçları karşılaştırması ...	25
Şekil 2.22. Kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin MBG eğrileri.....	25

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Kaynaklı plaka kalıntı gerilmelerin XRD ve MBG ile karşılaştırılması	26
Şekil 2.24. 4140 çelik plaka üzerindeki artık gerilmelerin karşılaştırılması.....	26
Şekil 2.25. Kalıntı gerilme giderme metotları sınıflandırılması	28
Şekil 2.26. Değişik sönümleme oranlarında genlikteki değişim ve rezonans.....	31
Şekil 2.27. Rezonans frekansı ve harmonik altı rezonans bölgesi	32
Şekil 2.28. Titreşim uygulaması ile kaynak profilindeki fark	33
Şekil 2.29. D6AC ve D406A kaynaklı plakalardaki XRD ölçüm noktaları	37
Şekil 2.30. Titreşimle gerilme giderme uygulaması ve yorulma test cihazı	40
Şekil 2.31. Deney numuneleri çekme deneyi sonuçları	42
Şekil 2.32. Deney numuneleri darbe deneyi sonuçları	42
Şekil 2.33. İşlemsiz numune ve TGG numune kalıntı gerilme değişimi	43
Şekil 3.1. Kaynaklı plakadan yorulma deney numunelerinin çıkartılması	46
Şekil 3.2. V Kanal açılmış plaka.....	47
Şekil 3.3. Kaynaklı çekme numunesi teknik resmi.....	48
Şekil 3.4. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi	49
Şekil 3.5. Sertlik ölçüm doğrultusu ve noktaları.....	50
Şekil 3.6. Eğme ve 3 nokta eğme yorulma deney numunesi	51
Şekil 3.7. Eğme testi standardı.....	51
Şekil 4.1. Ortalama elastisite modülü karşılaştırması	58
Şekil 4.2. Ortalama akma dayanımı karşılaştırması.....	58
Şekil 4.3. Ortalama çekme dayanımı karşılaştırması.....	59
Şekil 4.4. Kaynaklı plaka ön ve arka yüzeyi sertlik ölçüm konumları	60
Şekil 4.5. Kaynaklı plaka ön yüzeyi sertlik ölçüm sonuçları.....	61
Şekil 4.6. Kaynaklı plaka arka yüzeyi sertlik ölçüm sonuçları.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. 1. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları	63
Şekil 4.8. 2. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları	63
Şekil 4.9. 3. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları	64
Şekil 4.10. 1. Numune - Kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları ..	64
Şekil 4.11. 2. Numune - Kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları ..	65
Şekil 4.12. 3. Numune - Kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları ..	65
Şekil 4.13. Statik eğme deneyi – yük deplasman grafiği	66
Şekil 4.14. Yorulma deneyi sonuçları	67
Şekil 4.15. Titreşimle gerilme gidermenin deplasmana etkisi	68

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Titreşimle gerilme giderme uygulama örnekleri	29
Resim 3.1. Deney numuneleri ön hazırlık aşaması – plaka kaynağı	46
Resim 3.2. Kalıntı gerilme ve sertlik testleri plakası kaynağı.....	47
Resim 3.3. Kaynaklı çekme numuneleri	48
Resim 3.4. Manyetik Barkhausen gürültüsü ölçüm cihazı.....	53
Resim 3.5. Manyetik Barkhausen gürültüsü ölçüm ucu ve hareketli platform.....	53
Resim 3.6. TGG cihazı ve kısımları	54
Resim 3.7. Çekme testi numuneleri kalıntı gerilme giderme işlemi uygulaması	54
Resim 3.8. Kalıntı gerilme ölçümü plakalarına kalıntı gerilme giderme işlemi uygulaması	55
Resim 4.1. Gerilme gidermesiz numunelerin çekme deney sonucu hasar görüntüleri ..	59
Resim 4.2. TGG numunelerin çekme deney sonucu hasar görüntüleri.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

σ_{ut}	Malzemenin çekme dayanımı, MPa
σ_y	Malzemenin akma dayanımı, MPa
A	Uzama oranı yüzdesi
f	Frekans, Hz.
F	Uygulanan kuvvet, N
E	Malzemenin Elastisite modülü, GPa
N	Çevrim sayısı
t	Zamanı, sn.

Kısaltmalar

Açıklamalar

BSD	Brinell sertlik değeri
HB	Brinell sertlik değeri
İİGG	Isıl işleme gerilme giderme
ITAB	Isının tesiri altındaki bölge
MAG	Aktif gazaltında yapılan gazaltı ark kaynağı
MBG	Manyetik barkhausen gürültüsü
MIG	İnert gaz altında yapılan gazaltı ark kaynağı
MP	Manyetik parametre
TGG	Titreşimle gerilme giderme
TIG	İnert gaz ile yapılan tungsten ark kaynağı
WIG	Elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı
XRD	X ışını kırınımı metodu

1. GİRİŞ

Kaynak, metalik parçaların birleştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemlerden birisidir. İş makineleri, gemi, köprü ve baraj gibi büyük çelik yapılarda da kaynak yöntemi etkin olarak kullanılmaktadır. Bu tür ağır yükler altında çalışan yapıların başarıya ulaşması ve görevlerini yerine getirmeleri için dayanıklılık ve uzun ömür en önemli faktörlerdir. Kaynaklı yapılarda yorulma ömrünü etkileyen birçok sebep vardır. Bunların başlıcaları; artık gerilmeler, yüzey işlemleri, içyapı etmeni, gerime birikmesi ve korozyon etkisi olarak sıralanabilir.

Kaynak metodunun kullanıldığı tüm üretim işlemlerinde, kaynak sonrası oluşan kalıntı gerilme ve çarpılmalar, imalatı yapılan yapısal parçaların yorulma ömürlerini doğrudan etkilemekte ve malzemenin mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Bu sebeple artık gerilmelerin mümkün olduğunca azaltılması yüksek dayanım ve uzun ömür istenen konstrüksiyonlarda oldukça önem arz etmektedir. Yapılar üzerindeki kalıntı gerilmeleri azaltarak, yorulma ömürlerini arttırmak için çeşitli yöntemler mevcut olup bilinen en yaygın yöntem ısıtılma işlemi ile gerilme gidermedir. Bu çalışmada amaçlanan; ısıtılma işlemi alternatif bir yöntem olan ‘Titreşimle Gerilme Giderme (TGG)’ yöntemini uygulayarak, bu gerilme giderme metodunun kaynaklı parçaların yorulma dayanımları üzerindeki etkisini araştırmaktır.

Bu çalışmada, değişken yükler altında çalışan kaynaklı bağlantılarda, kaynak sonrası meydana gelen kalıntı gerilmelerin titreşimle gerilme giderme yöntemi ile azaltılması amaçlanmıştır. Yapıları olumsuz yönde etkileyen kalıntı gerilmelerin azalmasını sağlayarak kaynaklı bağlantıların yorulma ömrünü arttırmak hedeflenmiştir. Bu yöntem ile diğer kalıntı giderme yöntemlerinin uygulamasının zor olduğu iş makineleri gibi büyük kaynaklı konstrüksiyonlara fayda sağlayacağı öngörülmüştür.

Bu çalışma kapsamında; sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan DIN17100 (st52-3) malzemesi ile kaynak sonrasında TGG uygulanan ve gerilme gidermesiz numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Öncelikle iki farklı parametre için çekme deneyleri yapılarak, bu gerilme giderme metodunun malzeme şekil değiştirme kabiliyetine ve mukavemetine etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra yine malzeme mukavemetiyle doğru orantılı olan sertlik değerleri Brinell metoduyla numunelerin ön ve arka yüzünden

ölçülmüştür. Kalıntı gerilmelerin yorulma ömrüne etkisini incelemek için, TGG sonrası ve öncesinde kaynaklı plakaların ön ve arka yüzündeki kalıntı gerilme dağılımları Manyetik Barkhausen Yöntemi ile incelenmiş olup, bu metodun ilgili malzeme üzerindeki yüzdesel etkisi araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin karşılaştırılması amacıyla son olarak, üç nokta yorulma deneyleri yapılmıştır. Kaynak işleminden sonra uygulanan titreşimle gerilme giderme yönteminin yorulma ömrüne etkisi belirlenmiştir. Ek olarak, tez kapsamında yapılan deneysel çalışma sonuçları literatürde yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Öncelikli olarak çalışılan konu ile yakın literatür çalışmaları incelenmiş ve literatür taraması bölümünde anlatılmıştır. Kaynak metodu, kalıntı gerilme teorisi, kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri, kaynaklı bağlantılarda yorulma ve artık gerilme giderme yöntemleri literatür taraması bölümünde detaylıca anlatılmıştır. Kullanılan ve tercih edilen metodların avantaj ve dezavantajları anlatılarak yöntem tercih sebebi belirtilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde; kullanılan malzeme ve kaynak parametresi belirtilmiş olup tez kapsamında yapılan tüm deneysel çalışmalardan ve bu çalışmalarda kullanılan parametrelerden bahsedilmiştir. Sonuçlar ve tartışma kısmında ise elde edilen deneysel çalışma sonuçları paylaşılmış ve bu sonuçların sebep sonuç ilişkileri, diğer literatür çalışmalarıyla benzerlikleri anlatılmıştır. Son olarak çıkarımlar bölümünde, çalışma sonucunda elde edilen tüm sonuçlar tekrar kısaca açıklanmıştır.

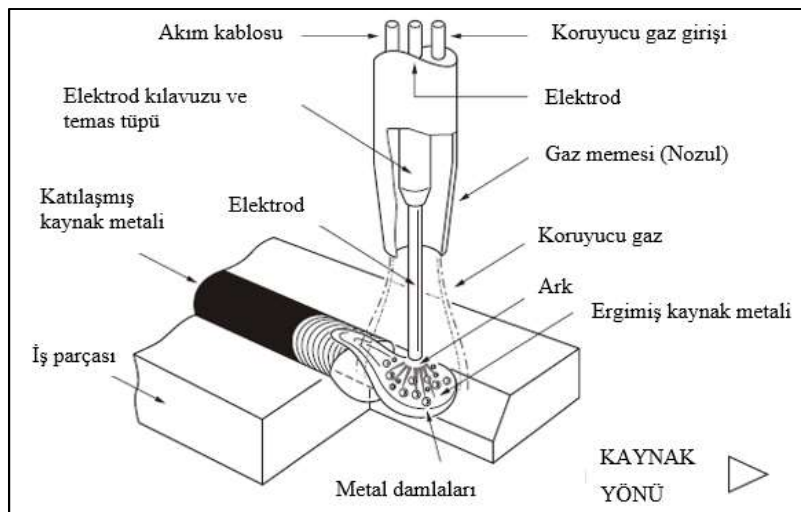
2. LİTERATÜR

Bu bölümde, tez konusu ile ilgili daha önce yapılan literatür çalışmaları açıklanmıştır. Öncelikli olarak gazaltı kaynağı açıklanmıştır. Daha sonra, kaynak sonrası yapı üzerinde meydana gelen kalıntı gerilmeler, kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri ve kalıntı gerilme giderme yöntemleri açıklanmıştır. Tez kapsamında uygulanan metotların seçilme nedenleri belirtilmiştir. Son olarak, kaynaklı bağlantılarda yorulma konusunda araştırmalar paylaşılmıştır.

2.1. Gazaltı Kaynağı

İki tane aynı veya farklı metalin ısı veya basınç kullanarak ilave elektrot kullanmadan ya da kullanarak yapılan birleştirme işlemine kaynak adı verilir. Genel anlamda kaynak yöntem ve çeşitleri ise, şu şekilde sıralanabilmektedir;

- Elektrik ark kaynağı
- Gazaltı kaynağı
- Oksi – Asetilen kaynağı
- Elektrik direnç kaynağı
- Enerji ışıın kaynakları
- Katı hal kaynak yöntemleri



Şekil 2.1. Gazaltı kaynağı mekanizması [1]

Bu tez kapsamında, kaynak bölgesini havanın ve çevrenin olumsuz etkilerinden korumak amacıyla kaynak sırasında çeşitli gazlar kullanılan “gazaltı kaynağı” uygulanmıştır. Gazaltı kaynağı mekanizması Şekil 2.1.’de görülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan gazaltı kaynak yöntemini aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz;

Ergimeyen elektrot ile yapılan gazaltı kaynak yöntemleri;

1. Ergimeyen iki elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı,
2. Ergimeyen bir elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı (TIG/WIG).

Ergiyen elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı;

- 1) Ergiyen elektrot ile soygazaltında yapılan gazaltı kaynağı (MIG),
- 2) Ergiyen elektrot ile aktif gazaltında yapılan gazaltı kaynağı (MAG).

Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı, sürekli beslenen ve eriyen bir tel elektrotla kaynak banyosu arasında oluşturulan ark yoluyla ve elektrottan geçen kaynak akımının elektrotta oluşturduğu direnç ısıtması yoluyla üretilir. Elektrot besleme aracıyla kaynaklı alana aynı hızla iletilir. Elektrot, kaynak banyosu, ark ve esas metalin kaynaklı bölgeye yakın alanları, atmosfer kirlenmesine karşı, dışardan tedarik edilen ve kaynaklı alana gaz memesinden gönderilen uygun bir gaz veya gaz karışımı tarafından korunur. Gazaltı kaynak yönteminde başka farklılık da elektrottadır. Dolu tel yerine içi metal tozu ile doldurulmuş tüpten oluşturulmuş özlü elektrotlar kullanılmaktadır. Böylece, örtülü elektrotlardaki örtünün bazı görevlerini özün, çekirdek telinin görevini de özü saran çelik tüpün görmesi sağlanmıştır [1].

Kaynağın kalitesini, geometrisini ve etki alanını etkileyen parametreler vardır. Uygulama alanına ve kullanılan malzemeye göre parametreler göz önünde bulundurulmalı ve en uygun seçim yapılmalıdır. Bu parametreler; kaynak akımı, ark boyu, kaynak hızı, serbest elektrod uzunluğu, elektrot açıları, kaynak pozisyonları, koruyucu gazlar, elektrod çapı, kaynak paso sayısı ve kaynak dikiş biçimi ve kaynak ağzı olarak sıralanabilir [3].

2.2. Kalıntı Gerilimler

Bir yapıda tüm yükler kaldırıldığı zaman ortaya çıkan kalıcı olmayan gerilmeler kalıntı (artık) gerilme olarak ifade edilir. Parçada oluşan kalıntı gerilme değeri en fazla malzemenin akma değeri kadardır. Bir yapıda sadece kalıcı olmayan şekil değişimine müsaade edilir. Aksi durumunda ise kalıcı şekil değişimi meydana gelir [5].

Artık gerilmeler kesim, büküm, kaynak gibi çeşitli üretim işlemlerinden sonra yapının içerisinde kaldığından kullanım sırasında dışarıdan uygulanacak olan gerilmeler kalıntı gerilmelerle birlikte yapıya etki eder. Bu nedenle kalıntı gerilme içeren bir yapıda, parçaya etki eden gerçek yükleme durumu teorik hesaplamalara göre tahmin edilenden çok farklı olabilir.

Artık gerilmeler üretilen parça içerisinde birbirini dengelemiş halde bulunurlar. Uygulanan üretim işlemlerinden sonra, parçanın belirli bir alanında mevcut olan basma artık gerilmeleri, diğer alandaki çekme kalıntı gerilmeleri ile dengelenirler. Sonuç olarak parçada kalıntı gerilim dağılımı oluşur. Kalıntı gerilimler üretilen parçanın yorulma ömrünü doğrudan etkilerler. Çekme kalıntı gerilimler malzemenin yorulma ömrünü azaltıp erken bir çatlağa neden olabilirken basma kalıntı gerilimlerin malzemenin yorulma ömrünü arttırıcı etkisi vardır [6].

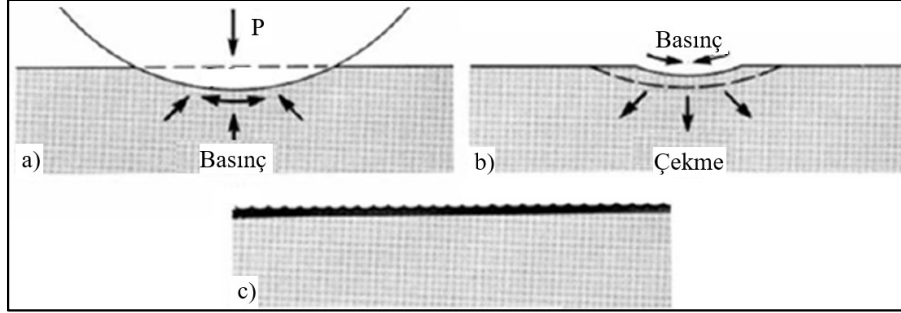
2.2.1. Kalıntı gerilmelerin oluşum nedenleri

Kalıntı gerilmelerin oluşumuna birçok faktör neden olmaktadır. Bu faktörler dört başlık altında sıralanabilir. Bunlar; mekanik yüklemeler, ısı yüklemeler, katı hal dönüşümleri ve kimyasal işlemler olarak sıralanabilir [7].

Mekanik yüklemelerin neden olduğu kalıntı gerilmeler

Yüzeye bastırılan bir bilye ile dışarıdan mekanik yükleme olduğunda, parça üzerinde oluşan kalıntı gerilme dağılımı Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Mekanik yükleme durumunda yüzeyde oluşan artık gerilmeler homojen olmayan kalıcı şekil değişimi oluşturmaktadırlar. Bilye parçaya battığında, yüzeyde oluşan eğri bilye küreselliğine yakındır ve kuvvet bu eğri biçiminde yayılır. Kuvvet uygulanmadan önce ilk durumda, parça yüzeyindeki gerilmeler

nötrdür ve kuvvetin bilye ile uygulanmasıyla yüzeydeki gerilmeler nötr durumdan, yüzey gerilmeleri sonucunda çekme gerilmesine dönüşürler. Aynı zamanda bilyenin uygulandığı bölgede, radyal doğrultularda artık basınç gerilmeleri oluşur [8].



Şekil 2.2. Mekanik yüklemelerin neden olduğu kalıntı gerilmelerin gösterimi [8]

Bilye uygulandığında, parça yüzeyinde bir miktar elastik şekil değiştirme de oluşmaktadır (Şekil 2.2.b). Bilye kaldırıldığı zaman bölgedeki kalıcı olmayan şekil değişiminden dolayı yüzeyde az oranda geri gelme olur. Bilyeli dövme işlemi, uygulandığı bütün yüzeylerde bu tip küçük çukurlar oluşturmakta ve ön gerilme yaratarak yüzeyde kalıcı basma gerilmeleri meydana gelmektedir (Şekil 2.2.c). Yüzeyde oluşan küçük çukurlar, parçanın çalışma durumunda yorulma, aşınma ve korozyondan dayanımlarını arttırmaktadır [8].

Isıl gerilmelerin neden olduğu kalıntı gerilmeler

Bir metalin ısıtılması ile oluşan genleşme ve soğutulması ile oluşan büzülme farklılıkları ısı sebebiyle kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olur. Isıl sebebiyle kalıntı gerilmeler ısı ve zorlama olmak üzere iki faktörün sonucu olarak meydana gelir. Şöyle ki, malzemedeki sıcaklık artışı ile malzemenin genleşmesinin engellenmesi durumunda ısı sebebiyle kalıntı gerilmeler oluşacaktır [8].

Kimyasal işlemlerin neden olduğu kalıntı gerilmeler

Dağlama, kimyasal işleme veya yüzeyden metal kaldırılması gibi kontrollü korozyon işlemleri parça yüzeyinde oluşan artık gerilme dağılımını değiştirmektedir. Denge içerisinde bulunan artık gerilmelerin dağılımının değişmesi, parçadaki metal katmanlarının çarpılmasına ve hatta çatlamalara neden olur. Yüzey kaplama işlemleri de belirli bir düzen

içerinde bulunan artık gerilme dağılımını değiştirmektedir. Nitrürleme ve karbürleme işlemleri esnasında, bu işlemde kullanılan azot ve karbür parçacıkları çevresinde mikro artık gerilmeler oluşurken kurşun, kadmiyum, çinko gibi yumuşak yüzey kaplamalarında yüzeyde parça yüzeyindeki artık gerilmeler azalabilir. Parça yüzeyinde meydana gelen basınç gerilmeleri yorulma ömrünü arttırdığı için, kalıntı çekme gerilmelerinde daha çok tercih edilmektedir. Fakat yapılan kimyasal işlemlerden sonra parça yüzeyinde çekme kalıntı gerilmeleri oluşursa ve bu çekme kalıntı gerilmelerin değeri parçanın elastik limitinin üzerinde ise, parça üzerindeki kaplamalarda çatlaklar gözlemlenir. Bu çatlakların doğrultuları çekme kalıntı gerilmelerine dik doğrultuda oluşacaktır [8].

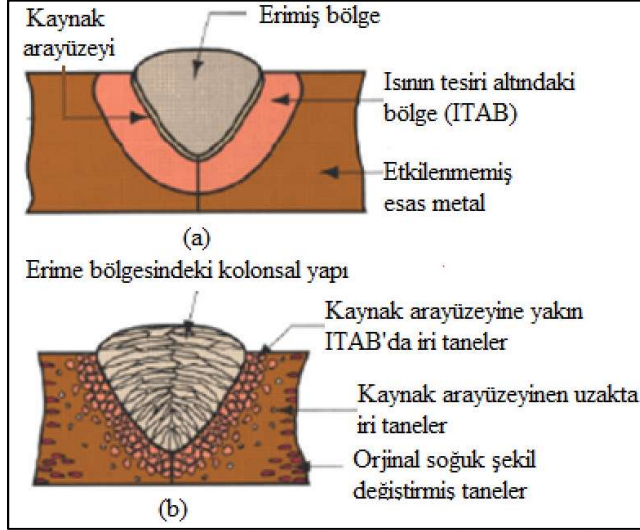
Katı hal dönüşümlerinin neden olduğu kalıntı gerilmeler

Kaynak, döküm ve su verme işlemleri, metal malzemelere uygulandıklarında, bu tür üretim metotlarında işlem basamaklarındaki soğuma şartlarından dolayı, metal malzemelerde bir veya daha fazla katı hal dönüşümü gerçekleşebilir. Katı hal dönüşümleri, metal parçada boyutsal ve kalıcı şekil değişikliklerini de beraberinde getirir. Parça üzerinde oluşan bu değişikliklerin kök sebebi, faz dönüşümleri ve oluşan artık gerilmelerdir. Artık gerilmelerin malzemede oluşması için kısa sürede gerçekleşen soğuma sırasında yüzey ve merkez arasındaki sıcaklık farklılıkları yeterlidir. Su verme işlemi sırasında östenitten martenzite olan faz değişiklikleri meydana gelir ve bu faz değişikliklerinde hacimsel değişikliklerin sebep olduğu yüksek artık gerilmeler oluşur. Su verme işleminde hızlı soğuma sırasında sertleşme dönüşümleri meydana gelir ve meydana gelen artık gerilmelerin temel prensibi birbirinin tersi gibi görünür. Her ikisi işlemde en geç soğuyan bölgelerin etkileşimini içerir. Fakat ısı etkisinin neden olduğu artık gerilmeler çekme gerilmeleri, katı hal dönüşümlerinin neden olduğu artık gerilmeler ise basma gerilmeleridir [8].

2.2.2. Kaynak sonrası kalıntı gerilmeler

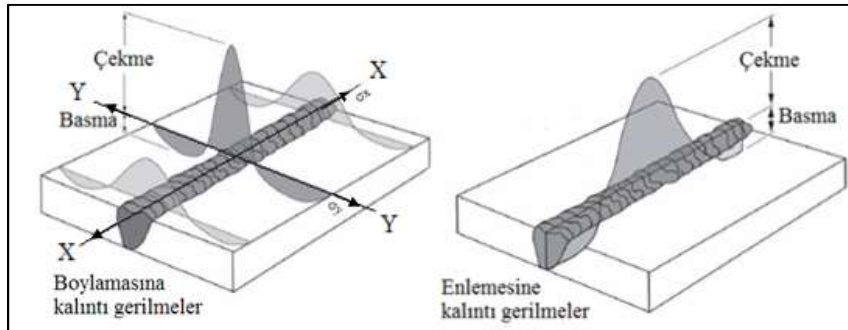
Kaynak yöntemlerinin büyük bir kısmında, birbirine birleştirilecek parçalar lokal olarak ergime sıcaklığının üzerine kadar ısıtılır. Bölgedeki ısıma ve soğuma farklılıklarından dolayı, kaynaklı bölgede düzgün olmayan sıcaklık dağılımı oluşur. Sıcaklık değişimi ve aynı zamanda metalürjik dönüşümlerinin olduğu kaynaklı bölgeye ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) denir. Kaynak işleminden sonra, ısı tesiri altındaki bölgede farklı büyüklükte tane boyutuna sahip bölgeler oluşur. Ana parçanın tane yapısı ile karşılaştırılırsa, ısı tesiri altında

oluşan taneler, daha çok hata barındırma riski mevcuttur. ITAB bölgesi Şekil 2.3.'de gösterilmiştir [7].



Şekil 2.3. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB) [7]

Kaynak işlemi sırasında, parçanın kaynak yapılan bölgesinde genellikle ısıtma hızı, soğutma hızına göre daha fazladır. İşlem sırasında, homojen olmayan sıcaklık dağılımından dolayı, parçada yapısal değişiklikler, çarpılmalar, meydana gelir. Bu sebeple, parçada erken soğuyan kısımlar bası, geç soğuyan kısımlar çeki gerilmeleri meydana getirir. Soğuma sürecinin başında kaynak metali sıcaktır ve mukavemeti esas metale oranla daha düşüktür. Sonuç olarak, kaynaklı yapıda kaynak doğrultusunda çekme gerilmeleri oluşur [9]. Bir kaynaklı plakadaki artık gerilme dağılımı Şekil 2.4.'te görülmektedir.

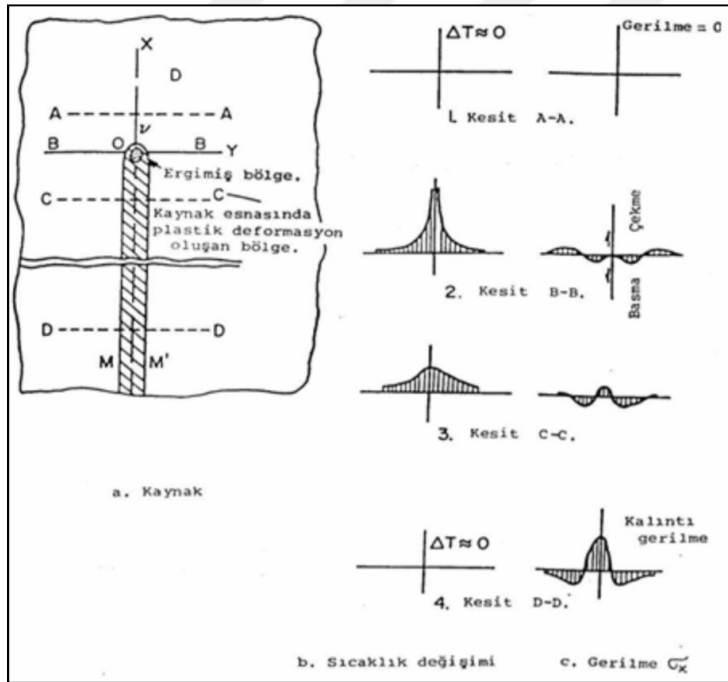


Şekil 2.4. Kaynaklı birleştirmede kalıntı gerilme dağılımı [2]

Şekil 2.4.'te alın birleştirmelerde enlemesine ve boylamasına dağılım görülmektedir. X-X doğrultusunda kaynak dikişine paralel oluşan gerilmeler boyuna gerilmeler olarak

adlandırılmakta olup, σ_x ile gösterilmektedir. Ek olarak bu doğrultuda elde edilen gerilme değeri, diğer gerilmelere göre daha büyük gerilme değerine sahiptir. Y-Y doğrultusunda oluşan enine gerilmeler ise σ_y ile gösterilir. Boyuna doğrultudaki gerilmeler (σ_x) kaynak dikişi çevresinde yüksek çekme gerilmesi şeklinde iken, kaynak dikişinden uzak mesafede bu gerilmeler azalarak, küçük değerlerde basma gerilmesine dönüşürler. Enine doğrultudaki gerilmeler ise (σ_y), kaynak dikişinin ortasında küçük değerlerde çekme gerilmesi, kenarlara doğru gidildikçe basınç gerilmesi şeklinde oluşur [8].

Tasarım aşamasında kalıntı gerilmelere ve çarpılmalara sebep olan etkiler bilindiği zaman, bu negatif etkileri yok edici birtakım önlemler alınabilir ve üretim sırasında alınacak önlemler ve üretimden sonra gerilme giderme işlemleri negatif etkiler en aza indirilebilir. Fakat hiçbir zaman artık gerilmeler ve çarpımlar tamamen yok edilemez. Çünkü parçalarda hal değişiminin olduğu tüm durumlarda artık gerilmelere ve çarpımlara rastlamak mümkündür. Bu negatif etkiler imalat işlemlerinden önce bilindiğinde, önlem alınarak olumsuzluklardan pozitif katkı sağlanması üzerine işlem yapılabilir [7].



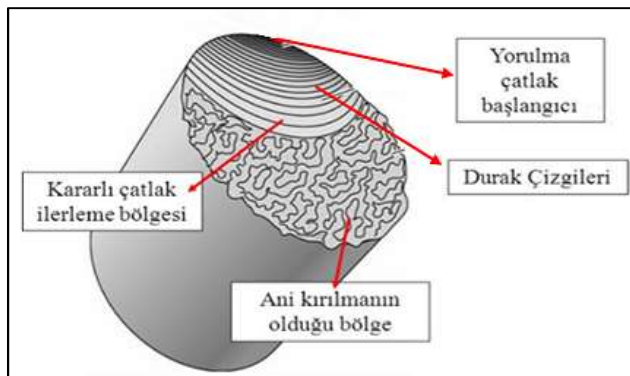
Şekil 2.5. Kaynaklı yapıdaki sıcaklık ve kalıntı gerilme dağılımı [7]

Kaynak doğrultusu boyunca zamana bağlı olarak, farklı kesitlerdeki artık gerilme dağılımı Şekil 2.5.'de görülmektedir. X yönünde dört farklı noktadan kesit alınmıştır. A-A, B-B, C-C ve D-D kesitlerindeki boyuna gerilmelerin dağılımı (σ_x) Şekil 2.5.'de verilmiştir. A kesitine

henüz kaynak ulaşmadığı için, bu bölgedeki ısı gerilmeleri henüz sıfırdır. B kesiti, bölgenin kaynak yapılan anı göstermektedir. Kaynak metali ısı altında henüz sıvı olduğu ve sıvı metal kuvvet taşımadığı için, bu kesitteki gerilmelerde sıfıra yakındır. ITAB bölgesindeki gerilmelerin bası yönünde olduğu görülmektedir çünkü düşük sıcaklıktaki kaynatılan parça, bu bölgenin genişlemesini engeller. Kaynak dikişinden uzaklaştıkça bası gerilmeleri maksimum noktaya ulaşır ve azalmaya başlar. Kaynaktan uzak bölgelerde ise, kaynak dikişine yakın bölgelerde oluşan bası gerilmeleri dengelemek için çekme gerilmeleri oluştuğu Şekil 2.5.'de görülmektedir. C kesiti soğumaya başlayan kaynaklı bölgedeki gerilme dağılımını göstermektedir. Bölge soğumaya başladığı için büzülme ve bu büzülmeyle ilgili olarak kaynak kenar bölgesinde çekme gerilmeleri oluşmaya başlamıştır. Son olarak, D kesiti incelendiğinde, kaynağın tamamen soğuduğu ve kaynak kenarında yüksek oranda çekme gerilmeleri oluştuğu, kaynaktan uzak bölgelerde ise basma gerilmelerin varlığı görülmektedir [10].

2.3. Yorulma

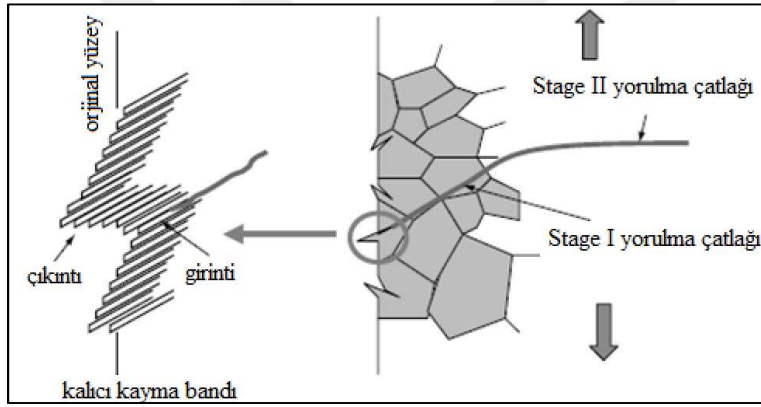
Birçok makine parçaları ve yapı elemanları genellikle dinamik yük etkisi altında çalışmaktadır. Dinamik etkiler altında çalışan parçalarda en önemli husus yorulma kırılmasıdır. Yorulma kırılması özet olarak; tekrarlı yükler altında çalışan komponentlerde, parçaya gelen kuvvet, parçanın akma sınırından düşük değerde olmasına rağmen, belirli bir tekrar periyodu sonunda ortaya çıkan kırılma durumudur. Yorulma süreci genellikle üç aşamada incelenir. Yorulma evreleri Şekil 2.6.'da görülmektedir. Bu aşamalar sırasıyla; yapıda küçük çatlak başlangıcı, küçük çatlak büyümesi ve final kırılma evreleridir.



Şekil 2.6. Yorulma çatlak evreleri

2.3.1. Yorulma mekanizması

Yapılardaki yorulma mekanizması Şekil 2.7.'de görülmekte olup kısaca şu şekilde açıklanır; başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen düzgün yüzeye sahip homojen kesitli bir malzemede akma dayanımı altında da dislokasyonlar lokal olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar, parça yüzeyinde çıkıntılar ve girintilerin oluşumuna neden olurlar. Malzemenin içyapısında bulunan bu hatalar gerilme yığılmaları oluşturur ve doğal olarak buradaki gerilmeler, parçanın geri kalan kısmına göre daha yüksek değere sahiptirler. Bu durumda tekrarlı yüklerin etkisi altında, plastik şekil değişimi oluşur. Malzeme pekleşir, gevrekliği artar ve ani yorulma kırılması meydana getirir.

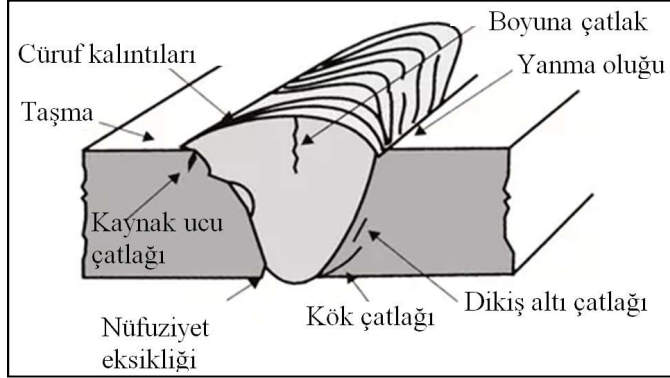


Şekil 2.7. Yorulma mekanizması

Kaynak teknolojisi endüstriyel gelişiminde önemli bir etkiye sahiptir. Kaynaklı üretim el ve/veya bilgisayar kontrollü olup, üretim ve imalat maliyetini azaltır. Kaynaklı birleştirme birçok endüstri dalında, karşımıza çıkar. Sanayileşmiş ülkelerde haddelenmiş çeliklerin %40-%50'si kaynak edilebilir özelliklerde üretilir ve çoğunlukla kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılır. Ağır yükler altında çalışan bu tip kaynaklı parçalar sadece statik zorlamalar değil, aynı zamanda değişken yüklerin etkisi altında kalırlar. Bu yüzden kaynaklı yapıların yorulma zorlamaları altındaki özellikleri önem kazanmıştır [12].

Kaynakta yorulma çatlakları, gözenek, birleşme eksikliği veya cüruf gibi iç kusurlarda ya da kaynak ucunda ve genellikle cüruf gibi kalıntılarda meydana gelir. Şekil 2.8.'de en yaygın kaynak hataları görülmektedir. Kaynaklı parçalarda yorulma çatlakları genellikle kaynak uçlarından başlar ve ilerler. Kaynakta oluşan hatanın büyüklüğü ve sıklığı kaynak işlemine

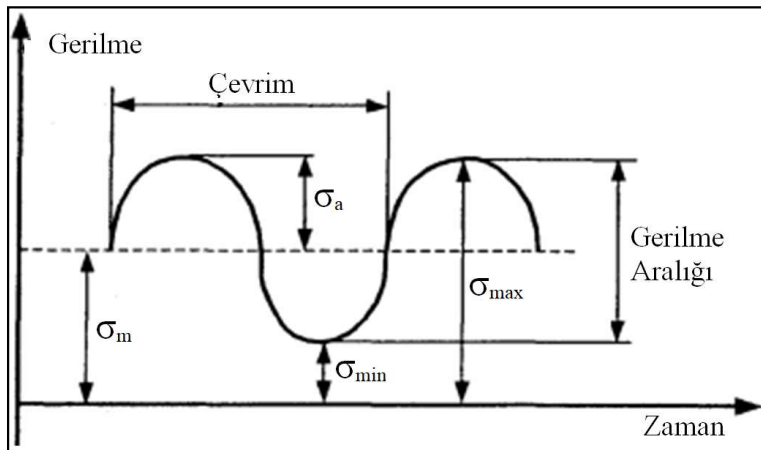
ve geometrisine bağılı olarak değişir. Sonuç olarak; yorulma çatlakları ve ilerlemesi yukarıda belirtilen hatalar olduğunda daha hızlı olur [13].



Şekil 2.8. Genel kaynak hataları [13]

2.3.2. Yorulma hesaplamaları

Dinamik ve değişken yükler altında çalışan kaynaklı yapılarda en önemli problem yorulma kırılmasıdır. Değişken zorlama, zorlanan parçanın kesitinde meydana gelen gerilmelerin maksimum ve minimum değerler arasında değiştiği bir zorlama şeklidir. Değişken zorlamalar nedeniyle kırılmalar malzemenin akma gerilmesinden daha düşük seviyelerde gerçekleşebilir. Değişken yükleme durumu Şekil 2.9.'da gösterilmiş olup yorulma dayanımına ait bazı terimler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.9. Değişken yükleme durumu [13]

Çevrim: Gerilme-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir.

Maksimum gerilme, σ_{max} : Gerilme periyodundaki en büyük gerilmedir.

Minimum gerilme, σ_{min} : Gerilme periyodundaki en küçük gerilmedir.

Ortalama gerilme, σ_m : En büyük ve en küçük gerilmenin toplamının yarısına eşittir.

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 \quad (2.1)$$

Gerilme genliği, σ_a : En büyük ve en küçük gerilmenin farkının yarısına eşittir.

$$\sigma_m = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 \quad (2.2)$$

Gerilme aralığı, σ_r : En büyük ve en küçük gerilmenin farkına eşittir.

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.3)$$

Çevrim sayısı, n : Deney sırasında herhangi bir durumda uygulanan periyot sayısıdır.

Yorulma periyot sayısı, N : Malzemenin kopma esnasındaki periyot sayısı.

Yorulma sınırı, σ_D : Malzemenin sonsuz sayıdaki gerilme periyotlarına dayanabileceği en büyük gerilmedir.

Yorulma sınırındaki gerilme genliği, σ_A : Belirtilen ortalama gerilme değeri σ_m ise;

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A \quad (2.4)$$

Periyot oranı, n/N : Uygulanan gerilme periyotlarının, kopma gerilmesi periyotlarına oranı

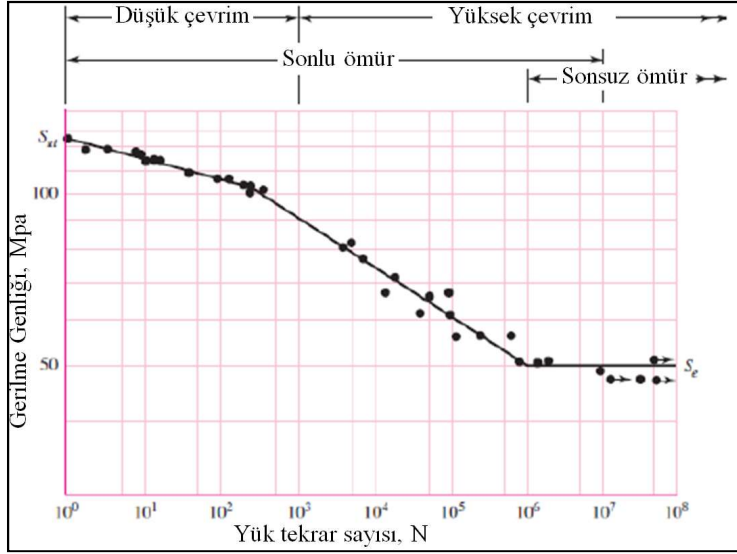
Gerilme oranı, R : Bir periyottaki en küçük gerilmenin, en büyük gerilmeye oranıdır.

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} \quad (2.5)$$

Genlik oranı, A : Gerilme genliğinin, ortalama gerilmeye oranıdır.

$$A = \sigma_A/\sigma_m \quad (2.6)$$

Malzemelerde oluşan yorulma hasarının önceden hesaplanabilmesi, yorulma hasarını engellemek için büyük önem taşımaktadır. Değişken yüklerle zorlanan parçaların ömürleri Şekil 2.10.'da gösterilen Gerilme-Ömür (WÖHLER) grafiklerinden belirlenebilir. Bu grafikler oluşturulurken, malzeme biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının her biri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları hesaplanır.



Şekil 2.10. Gerilme genliği-ömür grafiği

Yorulma deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve bu büyüklükler gerilme veya birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme veya alt gerilme sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği seçilir. İlk deney parçası üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile Wöhler eğrisi veya S-N eğrisi elde edilir. Bu eğrinin y eksenini gerilmeyi, x eksenini $\log N$ 'yi göstermektedir.

Bu eğri genel olarak iki ana kısımdan oluşur. Birinci kısımda N arttıkça σ_{max} değerlerinde çok fazla miktarda azalmalar olmaktadır. Başka bir deyişle bu kısımda eğrinin büyük bir eğimi vardır ve eğrinin sonlu ömür bölümüdür. İkinci kısım ise eğimi çok küçük olan ve N arttıkça eğimi azalan ve en sonda yatay bir doruya asimptot olan bir eğri karakteristiğine sahiptir. Bu kısım ise sonsuz ömür bölümü olarak değerlendirilir. Eğrinin birinci ve ikinci kısımları bir noktada kesişerek oldukça keskin bir köşe oluşturmaktadır. Çeliklerde bu kesişim noktasının apsisi 10^6 - 10^7 arasında değişmektedir. Oluşan köşenin yatay doğrultudaki değeri malzemenin yorulma sınırını göstermektedir. Bu değere denk gelen gerilme değeri veya bu değerden daha düşük değerlerde ne kadar yükleme yapılırsa yapılsın parçada kırılma olmayacaktır.

Bir taraftan mühendislik işlerinde karşılaşılan birçok makine elemanının yorulma sınırına sahip olmaması diğer taraftan bu karakteristiğin, buna sahip olan parçaların zorlukla saptanmasından dolayı yorulma sınırı yerine yorulma mukavemeti denilen bir karakteristiğin esas alınması daha uygun görülmüştür. Yorulma mukavemeti belirli bir sayıda yükleme sonunda cisimde yorulma kırılmasını meydana getirmeyen en büyük gerilme olarak tanımlanmaktadır. Yorulma mukavemeti bazı parçalar ve bazı malzemeler için özel olarak tanımlanabilir. Uluslararası Kaynak Enstitüsü kaynaklı birleşimler için bu belirli yükleme sayısı olarak 2×10^6 değerini vermektedir.

Kaynaklı parçaların tasarım aşamasında, yorulma ömürlerinin hesaplamalarında doğru seçimler yapabilmek için S-N eğrisi formülünün bilinmesi gerekmektedir. Kaynaklı parçalara ait S-N eğrisi değerleri arasındaki ilişki Eş. 2.7.' de görülmektedir. Bu denklemde m ve k birer sabit olup Y ise yorulma sınırıdır. N, $\sigma_{\max}$ 'ın belli bir değeri için kırılmaya sebep olan yükleme sayısıdır.

$$(\sigma_{\max} - Y)^m \cdot N = k \quad (2.7)$$

Farklı genliklerdeki değişken yüklemelerin parça üzerinde meydana getirdiği eşdeğer gerilme ya da parçanın eşdeğer ömrünün hesaplanmasında ise birikimli hasar teorisi kullanılır. Farklı genliklerdeki gerilmelere karışık olarak maruz kalan makine elemanları için gerçeğe en yakın sonuçları PALGREM-MINER birikimli hasar teorisi vermektedir. Palgrem-Miner kuralı basit olarak çevrim oranlarının toplamının 1'e eşit olması durumunda hasar meydana geleceğini ifade eder. Palgrem-Miner denklemi Eş. 2.8.'de incelenebilir [14]. Bu denklemde n belirli bir yükleme durumunda kısmi yükleme sayısıdır. Denklemde N ise, yine aynı belirli durumdaki aynı yük altındaki yorulma ömrüdür. Farklı yükleme koşulları için hasar oranları toplanır. K değeri, yani toplam hasar oranı 1'e eşit veya 1'den büyük olursa parçada kırılma durumu oluşur.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} + \frac{n_i}{N_i} = K \quad (2.8)$$

Yorulma mukavemeti birçok değişik faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır. Bu faktörlerin etkiye şeklinin bilinmesiyle ve bu etkiye şeklini göz önünde tutarak hareket edilmesiyle yorulma deneylerinde daha birbirine yakın ve sapması az olan sonuçlar elde edilebilir.

Ayrıca böylelikle deney sonuçlarının daha iyi bir şekilde yorumlanarak; yorulma etkisine maruz kalan bir malzeme daha elverişli koşullar altında kullanılmış olacaktır. Parça biçimi, parça büyüklüğü, yüzey işlemleri, korozyon ortamı, çalışma sıcaklığı, kuvvet frekansı ve imalat yöntemleri yorulma mukavemetine etkileyen parametreler olarak sıralanabilir [7].

2.4. Tahribatlı Ve Tahribatsız Kalıntı Gerilim Ölçüm Yöntemleri

Bir parçada veya yapısal elementte çekme kalıntı gerilmelerin varlığı genelde zararlıdır, çünkü yorulma hatası ve gerilme korozyonu çatlamasına katkıda bulunabilir ve çoğunlukla ana nedeni olabilirler. Aslında, basma kalıntı gerilmeler malzemenin (alt) yüzey tabakalarında farklı araçlarla indüklenen basınç gerilimi, yorulma çatlaklarının oluşumunu ve yayılımını önlediğinden ve aşınma ve korozyon direncini arttırdığı için genellikle faydalıdır. Malzeme seçimi ve tasarımında, kullanılacak malzemenin içindeki artık gerilme dağılımının önceden bilinmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin belirlenmesi günümüzde yaygınlaşmış bir uygulamasıdır. Artık gerilme ölçümleri için tahribatlı ve tahribatsız testler uzun zamandır kullanılmaktadır.

2.4.1. Tahribatlı kalıntı gerilim ölçüm yöntemleri

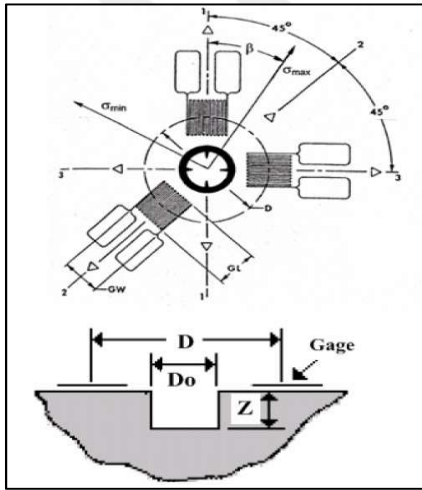
Tahribatlı kalıntı gerilim ölçüm yöntemlerinin diğer bir adı mekanik kalıntı ölçme yöntemleridir. Bu yöntemler çalışma prensibi genel olarak şu şekilde açıklanabilir; ilk önce ölçüm yapılacak parçadan kontrollü malzeme kaldırılır. Parçada, malzeme kaldırıldıktan sonra gevşemesi olur. Kontrollü parça kaldırıldıktan sonra oluşan şekil değişimi ölçümü yapılır. Daha sonra gerilmedeki yerel değişimler ölçülür ve elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır [15]. Kullanılan yaygın yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Tabaka kaldırma yöntemi

Tabaka kaldırma yöntemi ile kalıntı gerilmelerin ölçülmesi, kimyasal veya elektrokimyasal işleme yöntemleri ile yapılmaktadır. Bu yöntemin temeli, parça yüzeyinden artık gerilmeler içeren ince tabakaları kademeli ve kontrollü olarak kaldırılmasına dayanır. Kaldırılan tabakalarla iç gerilmeler dengelenir. Dengelenme durumundan dolayı oluşan gevşeme veya şekil değiştirmeler, parçadan kaldırılan tabakadaki gerilmelerle ilişkilendirilir ve elastisite teorisi yardımıyla kalıntı gerilmeleri hesaplamak amacıyla bu gerilmeler ölçülür [16].

Delik delme yöntemi

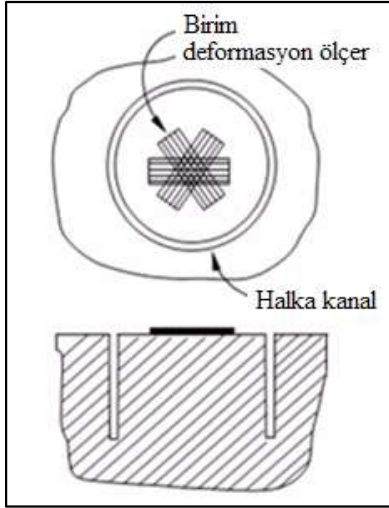
Delik delme yöntemi malzemeye çok büyük zarar vermediği, sadece çok küçük bir delik (0,8 mm-4,8 mm aralığında çapa ve yüksekliğe sahip) açıldığı için yarı tahribatlı kalıntı gerilme ölçüm tekniği olarak adlandırılır. Bu yöntem ile yüzeye yakın ve yüzey derinliğindeki artık gerilmeler oldukça hata oranı çok az olarak ölçülebilir. Malzeme yüzeyine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler ve malzeme yüzeyi, birim deformasyon ölçerlerin merkezinden delinir ve buna bağlı olarak var olan kalıntı gerilmelerin gevşemesi ile birim deformasyon ölçümleri alınır. Şekil 2.11.'de rozet birim deformasyon ölçerin (Strain gage) şematik görünümü verilmiştir [16].



Şekil 2.11. Rozet birim deformasyon ölçerin (strain gage) şematik görünümü [16]

Halka çekirdek yöntemi

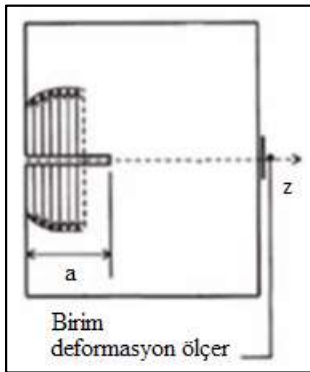
Bu yöntem uygulama ve prensip olarak delik delme yöntemine benzemektedir. Bu yöntemde de parça üzerine bağlanan gerinim ölçerden gevşemeye bağlı gerinim değeri okunur. Fakat delik delme yönteminde gerinim ölçerin ortasına kanal açılırken, bu yöntemde gerinim ölçerin çevresine dairesel kanal açılmaktadır. Bu yöntem genel olarak 0,1-6 mm mesafedeki artık gerilmeleri ölçebilmektedir. Yöntemin uygulanışı görsel olarak Şekil 2.12.'de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.12. Halka çekirdek yöntemi [16]

Kanal açma yöntemi

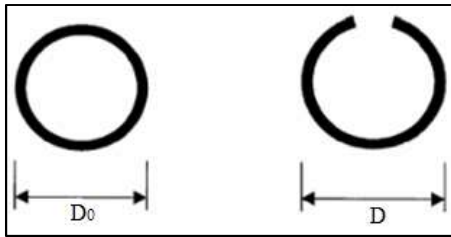
Bu yöntemde, artık gerilmeleri ölçmek için parça yüzeyine gerinim ölçer yapıştırılır ve gerinim ölçerin dik doğrultusuna küçük bir kanal açılmaktadır. Kanalin açılması ile kanala dik artık gerilmeler gevşemektedir. Gevşemeler sonucunda yapı içindeki gerilmeler tekrar dengelenir ve kanal bölgesinde meydana gelen kanala dik gerinme gevşemeleri gerinim ölçer kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntem ile en fazla 150 mm derinlikteki gerilme değerleri toplanabilir. Değişik geometriye sahip parçalara da uygulanabilir. Kanal açma yönteminin şematik görünümü Şekil 2.13.'de verilmiştir [16].



Şekil 2.13. Kanal açma yöntemi [16]

Tüp yarma yöntemi

Tüp yarma yöntemin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir, ilk olarak küçük bir tüp numunenin ilk dış çapı ölçülür, daha sonra tüp uzunluğu boyunca kesilerek yarık açılmaktadır. Gerilmelerin azalması sonucunda, tüpün dış uzunluğunun değişir. Gerilmelerdeki değişimler boşluklu tüpün açılıp kapanmasına sebep olur. Bu yöntem sadece artık gerilmelerin tahmini değerini vermekte olup bu yöntem uygulama tüpler ile sınırlıdır [16]. Şekil 2.14.'de tüp yarma yöntemi verilmiştir.



Şekil 2.14. Tüp yarma yöntemi [16]

İnce kesitlere ayırma yöntemi

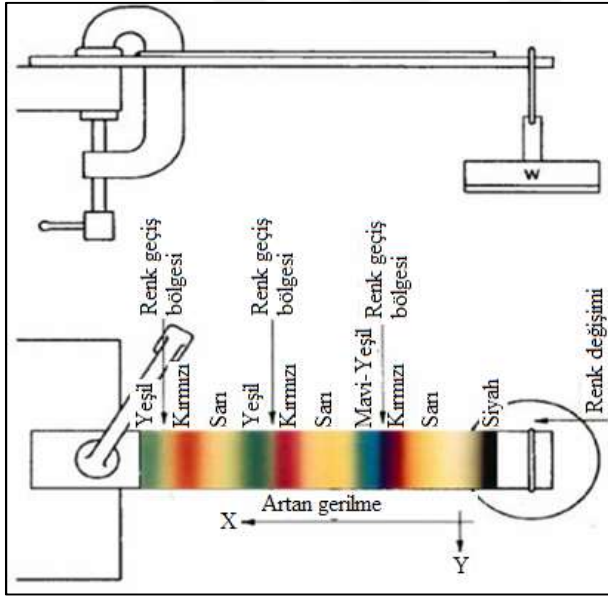
Bu yöntemde malzemede var olan artık gerilmeler malzemeden parçalar kaldırılarak ölçülmektedir. Artık gerilmeleri ölçmek için malzeme değişik kesitlere sıralı olarak bölünür. Bu işlemde yapılan bölme işlemi, ilgilenilen bölge boyunca artık gerilmelerin detaylarını görmek için ideal yöntemdir. Gerinim ölçer sayesinde ortaya çıkan gerinimler ölçülür [8].

2.4.2. Tahribatsız kalıntı gerilim ölçüm yöntemleri

Artık gerilmelerin belirlenip değerlendirilebilmesi için uygulanan tahribatlı testler uzun zamandır uygulanmaktadır. Ancak, tahribatlı yöntemler uygulama sırasında parçaya zarar vermekte olup çalışan parçaları daha sonra kullanılamaz duruma getirmektedir. Çalışan parçalara uygulama zorluğundan ve numunelere zarar vermesinden dolayı tahribatsız artık gerilme ölçüm yöntemleri giderek yaygınlaşmaktadır. Parça üzerinde tahribat oluşturmayan bu yöntemler ile artık gerilmeler malzemelerin çeşitli fiziksel büyüklüklerinden faydalanılarak belirlenmektedir [16]. Kullanılan yaygın yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Fotoelastisite yöntemi

Fotoelastik gerilme analizleri, genel olarak saydam malzemelerin oluşturduğu renkli kuvvet çizgilerinin gözlenmesi olarak açıklanabilir. Bu metot ile her türlü yapı içindeki gerilmeler gözle dışarıdan, herhangi bir ek model yapmaya gerek duymadan, görülebilir. Üzerinde kuvvet bulunan yapıda, polarize ışık demeti, fotoelastik bir yapıdan geçerken, parçayı farklı sürede geçen dikey titreşimlere dönüşür ve bu olaya fotoelastik etki denir. Optik aletlerle değerlendirilen ve deformasyonları ifade eden renk değişimleri kırmızı ve yeşil arasında olur ve bu renk arasındaki kuvvet geçiş çizgileri “fringe” olarak adlandırılır. Çizgi sıklığı kuvvet ile doğru orantılıdır. Düzgün renk görünümü ve renk geçişleri, yapı üzerindeki gerilmelerin düzgün dağıldığını gösterir. Şekil 2.15.’de bir kirişte oluşan kuvvet çizgileri ve renk değişimleri verilmiştir [7].



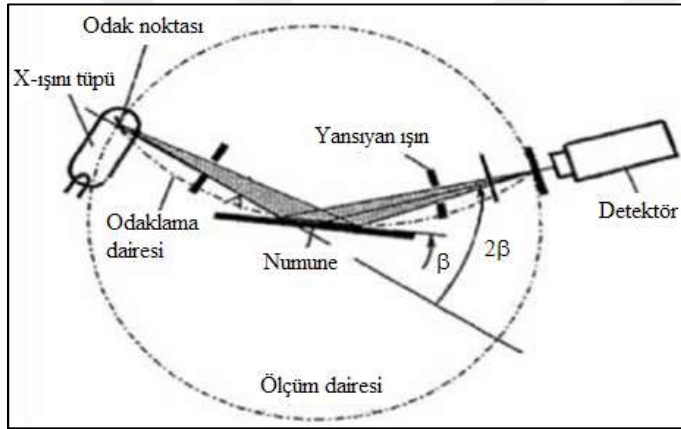
Şekil 2.15. Bir konsol kirişte oluşabilecek kuvvet çizgileri [7]

Kırınım yöntemleri

Bu yöntem sadece kristal yapılı malzemelere veya kristal fazlara uygulanabilir. Çalışma prensibi; malzemenin gerilme altında olduğu durumda, malzemedeki kristal düzlemler arasındaki mesafe değişimlerini değerlendirerek, kafes gerilmelerine dönüştürmesi şeklindedir. X-ışını, şiddetli X-ışını ve Nötron kırınımı en yaygın kırınım metotlarıdır.

X-ışını kırınımı yöntemi

X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, artık gerilmeleri ölçmek için kullanılan en yaygın tahribatsız yöntemlerden birisidir. Yapılan ölçüm sonuçları hassas ve detaylıdır. Ölçümler yüzeydeki gerilmeleri verir, derindeki gerilmeleri elde etmek için yüzeyden tabaka kaldırma işlemi gerekmektedir. Maliyetli olması ve laboratuvar ortamında çalışılması gerektiği için çok büyük yapılara uygulanamaması yöntemin dezavantajıdır. Malzeme üzerinde gerilme ölçümü yapılmak istenilen bölge seçilir ve bu bölgeye tekrarlı olarak X-ışınları ile malzeme taranır. Paralel atom düzlemleri arasındaki mesafe hesaplanır [8]. Geleneksel XRD yöntemi Şekil 2.16.'de görülmektedir.



Şekil 2.16. Geleneksel X-ışını yöntemi [8]

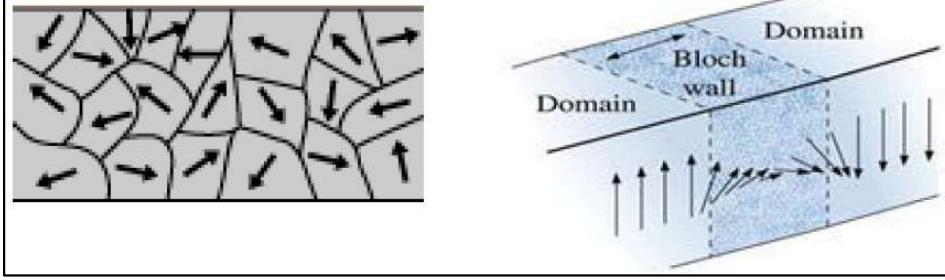
Ultrasonik yöntemler

Katı yapı boyunca ilerleyen ses ötesi (ultrason) dalga hızlarının yapı içerisindeki mevcut gerilme seviyelerine duyarlılığından faydalanarak kalıntı gerilme ölçümleri yapan metot Ultrasoniktir yöntemidir. Artık gerilmelerin yönleri ve değerleri parçadaki ses ötesi dalga hızlarının değişimini değiştirmektedir. Bu durumda parçanın yüksüz durumda ilettiği ses ötesi dalga hızı ile parçanın yük altındaki ilettiği dalga hızları farklılık gösterir [7].

Manyetik Barkhausen gürültüsü yöntemi

Yük altında, çeliklerin ve diğer ferromanyetik malzemelerin manyetik özelliklerindeki değişimini hesaplayarak artık gerilme ölçümü bu yöntem ile yapılmaktadır. Ferromanyetik

malzemeler, elektromanyetik etkilere karşı oldukça hassastır. Bu yöntem gerilme ve mıknatıslanma arasındaki etkileşime dayanmaktadır. Yapıdaki gerilme dağılımına ve varlığına göre yapının elektromanyetik özellikleri değişmekte olup bu değişimin ölçülmesi ile parçadaki gerilme değişiklikleri tespit edilmektedir.



Şekil 2.17. Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller [17]

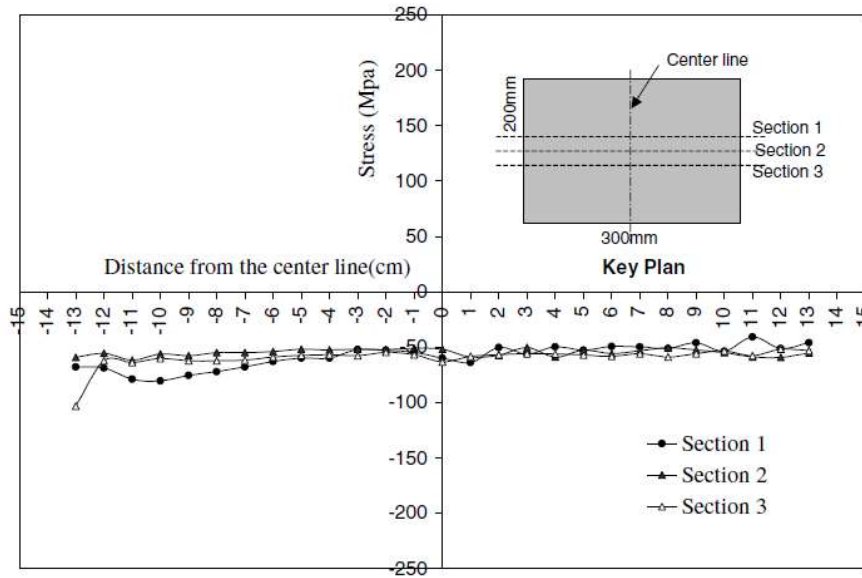
Şekil 2.17.'de görüldüğü gibi, manyetik dipol adı verilen küçük yapılar domen adındaki bölgeleri, domenler bir araya gelerek ferromanyetik malzemeleri oluştururlar. Manyetik dipoller aynı yöne doğru yönelmektedirler ve beraber yönlenme sonucunda oluşan domen duvarları, domen bölgelerini birbirinden ayırır. Ferromanyetik parçalarda, bu bölgelerde mıknatıslanma homojen dağılmaktadır. Uygulanan yük sonrasında dağınık halde bulunan manyetik dipoller uygulanan kuvvet yönünde dönmeye başlarlar [17]. Bu ölçüm yöntemi ile yük altında malzemenin manyetik gürültüsü analiz edilerek gerilme değerleri elde edilir.

Ölçüm yapılacak parçanın boyutsal özelliklerine göre özel hazırlanabilen probalar ile parça mıknatıslanırken aynı anda parça yüzeyinden ölçüm değerleri elde edilir. Elde edilen değerler manyetik parametre (MP) cinsindendir. Elde edilen manyetik parametre değerlerini gerilme değerlerine çevirmek için kalibrasyon (ölçümleme) eğrilerinden yardım alınır. Kalibrasyon eğrileri, test sırasında kullanılan malzemeye özel olarak yapılan çekme ve basma testleri sonucunda elde edilir. Sonuç olarak, malzemeye özel kalibrasyon eğrileri kullanılarak parça içerisindeki artık gerilme değerleri hesaplanabilir [17].

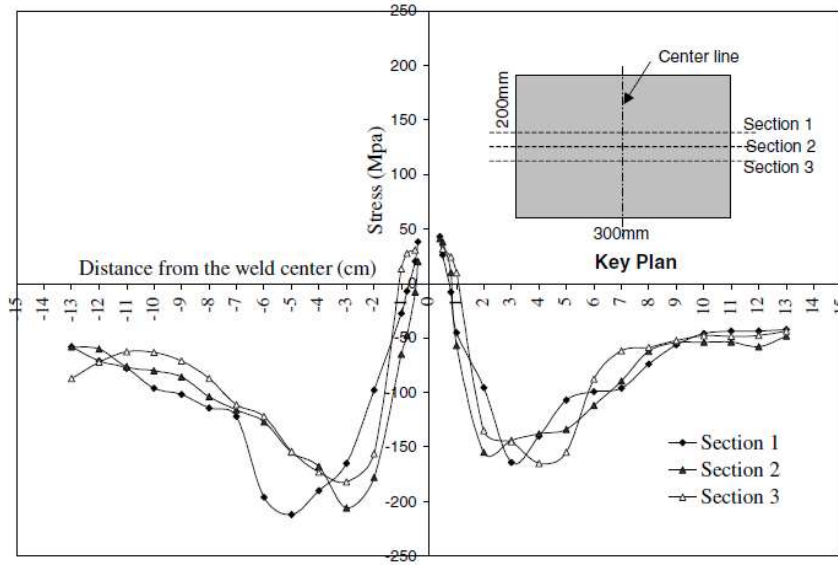
Bu metot ile artık gerilme sonuçlarına ek olarak ısıtılmalardan sonra veya kaynaklı imalat sonucunda meydana gelen mikro yapı değişimleri de bulunabilir. Ölçüm anında, değer alınan parçanın çekme gerilmeleri barındırdığı bölgelerde manyetik parametre değeri artma eğilimi gösterirken, basma gerilmelerin olduğu bölgeler de ise manyetik parametre değerini azalma eğilimi göstermektedir [17].

Diğer tahribatsız yöntemler ile kıyaslandığında, bu yöntemin maliyetinin az olması, ön hazırlık sürecinin basit olması, elde edilen gerilme değerlerini kısa sürede ve doğru verebilmesi yöntemin pozitif yönleri olarak sayılabilir. Bu sebep ile kullanımı yaygınlaşmış olup yöntemin önemi artmıştır. Test yapılacak malzemede gerilmelerin doğru bulunabilmesi için kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması ve ölçümlerin özel prob aracılığı ile yapılması yöntemin negatif yönlerindendir. Çalışma kapsamında kalıntı gerilme ölçümleri için bu yöntem kullanılacaktır. Yöntemin, kaynaklı plakalarda kalıntı gerilme ölçünde, Manyetik Barkhausen Gürültü yöntemi ve diğer ölçüm yöntemlerinin karşılaştırmalarını içeren bazı literatür sonuçları açıklanmıştır.

2006 yılında yayınlanan çalışmada kaynaklı plaka üzerindeki kalıntı gerilmelerin Manyetik Barkhausen yöntemi ile ölçümü üzerine çalışılmıştır. Deney numuneleri 6 mm kalınlığında ve düşük karbonlu çeliktir. Şekil 2.18.'de kaynak yapılmamış plaka yüzeyinden 3 ayrı hat boyunca ölçümler alınmıştır. Daha sonra plaka kesilerek orta noktasından kaynatılmış ve aynı 3 hat boyunca ölçümler tekrar alınmış olup Şekil 2.19.'da görülmektedir. Kaynaktan önceki ve kaynaktan sonra plaka yüzeyinde oluşan kalıntı gerilme dağılımı Barkhausen gürültü yöntemi ile bulunmuş ve daha önce malzemeye bağlı oluşturulan kalibrasyon eğrisi ile MP değerleri gerilmeye çevrilmiştir [18].



Şekil 2.18. MBG yöntemi ile kaynaklı plakadan kalıntı gerilme ölçümleri [18]



Şekil 2.19. MBG yöntemi ile kaynaklı plakadan kalıntı gerilme ölçümleri [18]

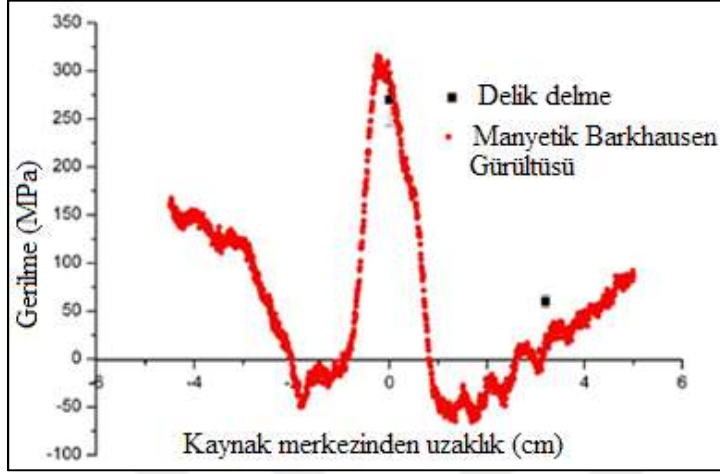
Yapılan çalışma kapsamında kaynaklı plakalarda kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin ölçümleri hem X-ışını kırınımı yöntemi ile hem de Manyetik Barkhausen Gürültüsü Yöntemi ile ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.20.'deki sonuçlar incelendiğinde iki farklı ölçüm arasındaki sapma oranlarının az olduğu görülmektedir [18].

Kaynaktan uzaklık (mm)	XRD (MPa)	MBN (MPa)	% sapma
70	-119	-110	8
60	-121	-119	2
50	-125	-134	7
40	-141	-138	2
30	-144	-144	0
-30	-185	-192	4
-40	-146	-168	15
-50	-143	-155	8
-60	-138	-127	8
-70	-128	-116	9

Şekil 2.20. Kaynaklı plakalarda XRD ile MBG yönteminin karşılaştırılması [18]

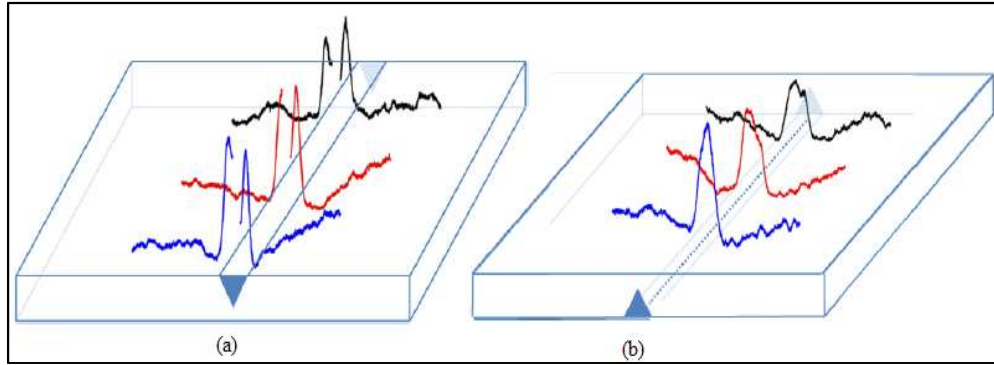
Şekil 2.21.'de İlker Yelbay tarafından yapılan çalışma [6] sonuçları görülmektedir. Çalışma, 15 mm API 5L X70 çeliği üzerinde kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin manyetik barkhausen yöntemi ile ölçülmesini içermektedir. Ölçümler kaynaklı plakanın ön ve arka yüzeyinden elde edilmiştir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar, 2 farklı nokta için delik delme

yönteminden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Ölçüm alınan pozisyonlardaki değerler oldukça yakın olduğu Şekil 2.21.'de görülmektedir.



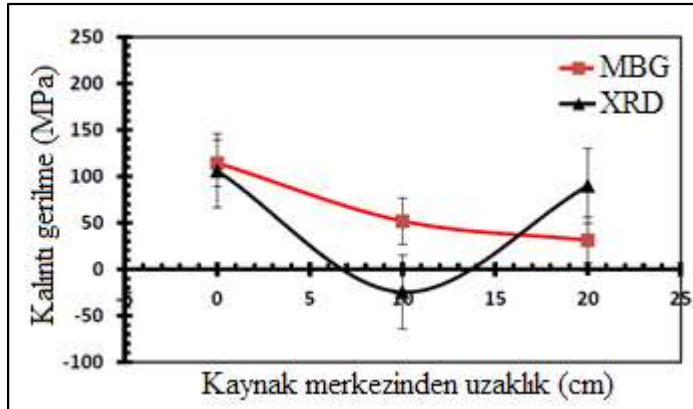
Şekil 2.21. MBG Yöntemi tekniği ve delik delme yöntemi sonuçları karşılaştırması [6]

İlker Yelbay'ın çalışmalarında kaynaklı plakadan MBG yöntemi ile elde ettiği kalıntı gerilme eğrileri Şekil 2.22'de görülmektedir. Şekil 2.22.a plakanın ön yüzündeki dağılımı, Şekil 2.22.b ise plakanın arka yüzündeki dağılımı göstermektedir [6].



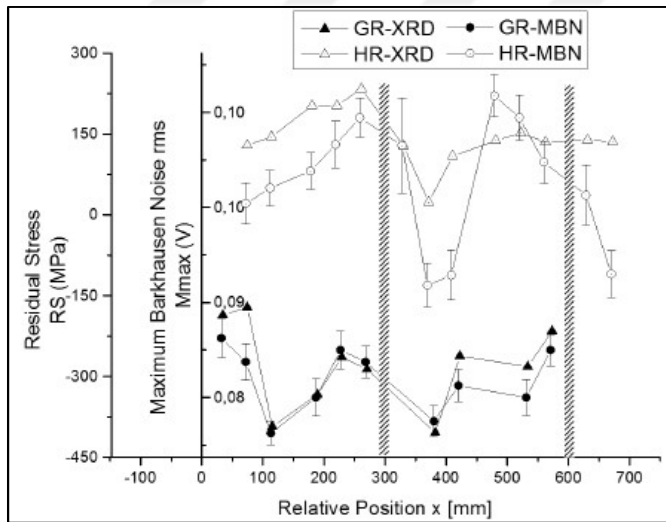
Şekil 2.22. Kaynak sonrası kalıntı gerilimlerin MBG eğrileri a) ön yüz b) arka yüz [6]

Gökhan Erian tarafından, 2012 yılında yapılan çalışmada [19], 18 mm kalınlığında API 5L X70 çelik plakada kaynak sonrası kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Kalın plakada çok pasolu kaynak uygulanmış ve artık gerilme ölçümleri MBG yöntemi ile yapılmıştır. Yöntemin doğruluğunu teyit etmek için aynı plaka 3 farklı noktada XRD ile ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.23.'de karşılaştırma sonuçları görülmektedir.



Şekil 2.23. Kaynaklı plaka kalıntı gerilmelerin XRD ve MBG ile karşılaştırılması [19]

2015 yılında, 2 mm kalınlığındaki 4140 çeliği üzerinde yapılan başka bir çalışmada plaka üzerindeki artık gerilmeler MBG yöntemi ve XRD ile ölçülüp karşılaştırılmıştır. HR değerleri ilk test sonuçları olup plakanın sıcak hadde sonrası üzerindeki gerilmelerdir. GR değerleri ise ikinci test sonuçlarını olup plakanın temperleme işlemi sonrası üzerindeki gerilmeleri ifade etmektedir. Şekil 2.24.'de görülen sonuçlara göre MBG ve XRD ölçümleri arasında oldukça yakın korelasyon elde edilmiştir [20].



Şekil 2.24. 4140 çelik plaka üzerindeki artık gerilmelerin karşılaştırılması [20]

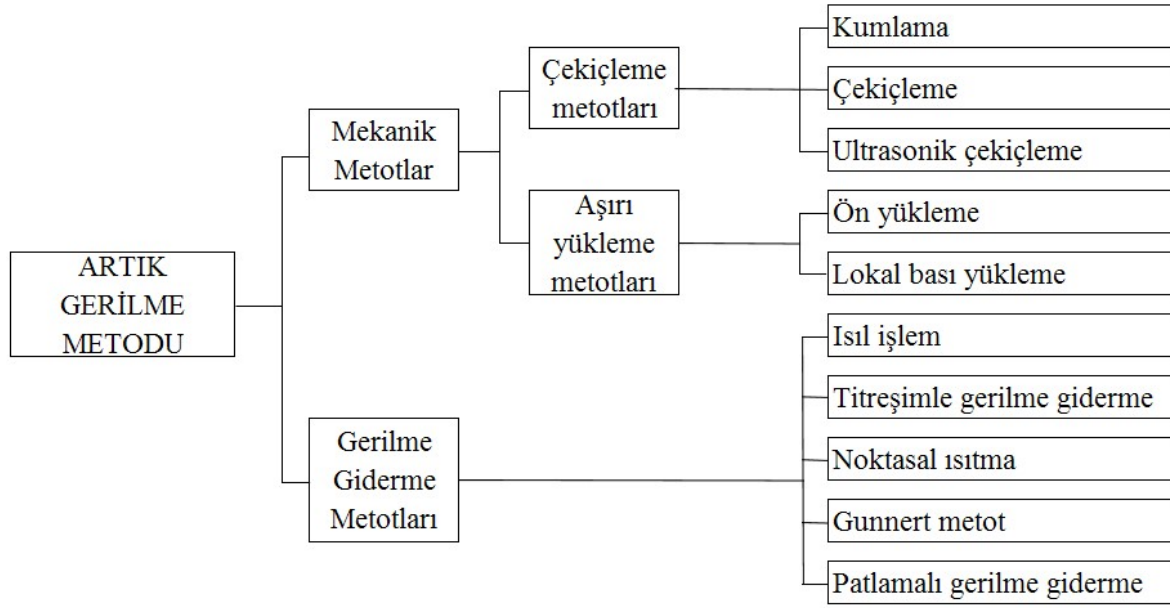
2.5. Kalıntı Gerilme Giderme Yöntemleri

Birçok durumda, ağır yük altında çalışan yapılarda yorulma dayanımını arttırmak için tasarım oluşturan detaylarının iyileştirilmesi yöntemi uygulanabilir. Örneğin, tasarımda uygulanan kaynaklarda iyileştirme metotları ile yorulma dayanım sınıflarının bir üst kaynak sınıfına çıkartılması sağlanarak konstrüksiyonun ömrü arttırılabilir. Bazı uygulamalarda bu tür uygulamalar pratik olmayabilir. Fakat bu tür kaynaklarda iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak uygulanan yapıyı güçlendirme yöntemleri de ek maliyete sebep olurlar.

Günümüzde, kaynak iyileştirme teknikleri başarılı şekilde, gemi, köprü, demiryolu, iş makinaları gibi ağır yük altında çalışan yapılarda uygulanmaktadır. Bu tür iyileştirme tekniklerine ilgi artmasına rağmen, hangi tekniklerin hangi yapılara etkin şekilde uygulanacağı konusunda eksiklikler vardır.

Genellikle kaynak yorulma iyileştirme metotları, kaynak geometrisi iyileştirme ve kalıntı gerilme giderme olarak iki ana başlıkta incelenir. Kaynak geometrisi iyileştirme yöntemleri, kaynak ucundaki hataların uzaklaştırılması ve-veya kaynak ucundaki gerilme yığılmasının azaltılması ile yorulma ömrünü uzatmaktadır. Kalıntı gerilme giderme ile iyileştirme yöntemleri ise, çatlakların başlaması yüksek olası olan bölgelerdeki çekme gerilmelerini basma gerilmelerine dönüştürerek yorulma ömrünü arttırmaktadır. Şekil 2.25.'de kaynak sonrası çeşitli kalıntı giderme yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir. [21]

Kaynaklı parçalarda artık gerilmelerin azaltılması için günümüzde yaygın olarak uygulanan yöntem ısıtma işlemiyle gerilme giderme uygulamasıdır. Fakat endüstriyel uygulamalar da bu yöntemin, maliyet, zaman, parça büyüklüğü gibi kısıtlamaları araştırmacıları başka yöntemlerle artık gerilmeleri azaltmaya yöneltmiştir. Çalışma kapsamında alternatif yöntemlerden bir tanesi de kaynaklı parçaya verilen titreşim kuvvetleri sayesinde artık gerilmeleri gideren titreşimle gerilme giderme yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 2.25. Kalıntı gerilme giderme metotları sınıflandırılması [21]

2.5.1. Isıl işlem

Isıl işlem, ısıtma, belirli bir sabit sıcaklıkta yeterli bir süre ve kontrollü olarak soğutma olmak üzere üç kademedен oluşan gerilme giderme metodudur. Bütün ısıl işlem türlerinin amacı, yapıya istenilen özelliği kazandırmaktır.

Isıl işlem, parçalardaki kristal yapıyı istenilen şekilde değiştirerek, yapının sertlik, dayanım veya işlenebilirlik özelliklerini etkilemektedir. Çeliğin yapısındaki karbon miktarı ısıl işlem için en önemli parametredir [23].

Parçaya uygulanan işlemler sonrasında meydana gelen, artık gerilmeleri gidermek için gerilim giderme tavlama uygulanmaktadır. Gerilim giderme tavlama dönüşüm olmayacak şekilde 723°C'nin altında uygulanmakta olup genellikle 550-650 °C arasındadır [22]. Bu uygulama için özel fırınlar gerekmektedir. Uygulama sırasında ısıtma ve soğutma işlemleri zaman almaktadır. Isıl işlem yüksek enerji gerektirdiği için maliyetlidir. Ek olarak, uygulama alanı dolayısıyla, gerilme giderilmek istenilen parçanın belirli bir boyutu aşmaması gerekmektedir. İçyapı değişimleri, parçanın mekanik özellikleri de değiştirmektedir.

2.5.2. Titreşimle gerilme giderme

Bir asırdan fazla süredir ısıl işlemle gerilme giderme işlemi artık gerilmelerin giderilmesinde en etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ancak yöntemin sebep olduğu bazı kısıtlamalar, her malzemeye uygulanamaması, maliyetinin çok olması gibi nedenlerden dolayı araştırmacılar farklı arayışlar içerisine girmişlerdir. Özellikle 2. Dünya Savaşında üretilen büyük savaş makinelerinin gerilme gidermelerinin yapılabilmesi için Almanya’da ve Amerika’da yoğun süren çalışmalar yapılmıştır [4]. Resim 2.1.’de titreşimle gerilme giderme uygulamaları görülmektedir.



Resim 2.1. Titreşimle gerilme giderme uygulama örnekleri [25]

1943 yılında McGoldrick ve Saunders tarafından yapılan ilk çalışmalarda hem döküm hem de kaynaklı parçalarda titreşimle gerilme giderme için, bu işlemin iş parçasında plastik şekil değişikliğine neden olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Daha sonraki çalışmalarında da rezonans titreşimlerin en etkin genliklerde kullanılması gerektiğini önermişlerdir [24].

Titreşimle gerilme gidermenin yaygınlaşması son 40 yılda olmuştur. Günümüzde makine sektörü, kalıpcılık, otomotiv, gemi endüstrisi olmak üzere birçok sanayi alanında uygulanmaktadır. Kullanımındaki bu hızlı artışın nedenlerini ise şöyle sıralayabiliriz;

- Çok farklı sac kalınlıklarını bir arada barındıran, özellikle kalın cidarlı, iş parçalarında ısıl işlemin çok verimli olmaması,

- Boyutsal kararlılık gerekliliği istenen östenitik paslanmaz çeliklerin ve tüm demir dışı metallere kaynağından sonra uygulanan titreşimle gerilme gidermenin ısıtma işlemiyle gerilme giderme uygulamasından daha iyi sonuç vermesi,
- Isıtma işlemiyle gerilme gidermenin malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmemesi,
- Titreşimin neredeyse her boyutta veya ağırlıkta iş parçasına uygulanabilir olması,
- Titreşimle gerilme gidermenin maliyetinin düşük olması ve çevreyi kirletmemesi,
- Bimetalik komponentlerin kullanımlarının artması ve ısıtma işleminin bu tür malzemeler için uygun olmaması,
- Titreşimle gerilme giderme uygulamasının kolay ve hızlı olması [24].

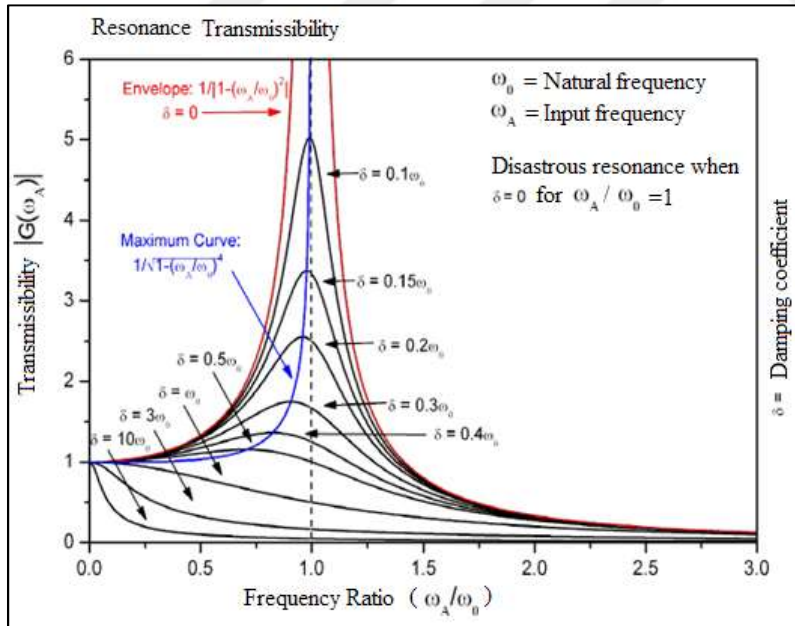
Çizelge 2.1. Gerilme giderme yöntemlerinin karşılaştırılması [25]

Gerilme Giderme Türü	Titreşim	Isıtma İşlem	Soğuk İşlem (Cryogenics)
Özellik			
Etkinlik	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel
Kaynak sırasında uygulama	Mükemmel	İyi	Uygulanmaz
Bitmiş parçalara uygulama	Mükemmel	Uygulanmaz	Zayıf
Yüksek dayanımlı malzemelere uygulama	Uygulanmaz	Mükemmel	Orta
Yüzeyde sertlik oluşumu	Uygulanmaz	Mükemmel	Uygulanmaz
Ağırlık ve hacim sınırı	Mükemmel	Orta	Zayıf
İşlem sonrası yan etkilerin olmaması	Mükemmel	İyi	Zayıf
Zaman kazancı	Mükemmel	Orta	Zayıf
Yorulma ömrünü arttırma	Mükemmel	İyi	Mükemmel
Deneysel destekler	İyi	Mükemmel	Zayıf

Bu yöntemin yaygınlaşmasının sebebi kalıntı gerilmelerin ısıtma işlemiyle giderilmesinde yaşanan kısıtlamalardır. İmalatı yapılacak iş parçasının geometrik boyutunun ısıtma işlemi fırınına bağlı olması, ısıtma işleminin yüksek enerji gerektirmesi ve pahalı olması, ek olarak zaman ihtiyacı gerektirmesi farklı yöntemlere yönelimlere sebep olmuştur. Yaygın yöntemlerle karşılaştırılması cihazın patentini elinde bulunduran Metalax firması tarafından yapılmıştır. Tablonun oluşturulması için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 2.1.'de görülmektedir. Çizelgede, titreşimle gerilme giderme yöntemi, 2 farklı yaygın yöntem ile karşılaştırılmıştır.

Titreşimle gerilme giderme temel olarak, iş parçasına rezonans frekansında veya rezonans frekansına yakın titreşim uygulanarak parçanın iç gerilmelerini giderecek olan enerjiyi absorbe etmesini sağlama prensibine dayanır [4].

Titreşimle gerilme mekanizması hakkında başlıca iki ana hipotez mevcuttur. İlk hipotez, titreşimle gerilme giderme işlemini ısıtma işlemi mekanizmasına benzetmekte olup, yeterli miktarda enerji alan atomlar yeniden pozisyonlanırlar. Bu hipotez, içyapıdaki sürtünme ile malzemede doğal yaşlanma meydana gelir. Yaşlanma işleminde dislokasyon hareketi engellenir ve malzemenin dayanımı artar. Bu hipotez deneysel çalışmalarla kanıtlanamamıştır. İkinci hipotez ise, parçada plastik deformasyon sonucu kalıntı gerilmelerin azaldığını iddia etmektedir. Bu hipotez deneysel çalışmalarla da desteklenmiş olup direkt parçadaki plastik deformasyon oluşumu gözlenememiştir. Titreşim uygulaması, parça üzerinde tekrarlı gerilme oluşturur ve tekrarlı gerilmeler parçanın akma noktasını geçer. Sonuç olarak parçada plastik deformasyon oluşur ve kalıntı gerilmeler azalır [37].

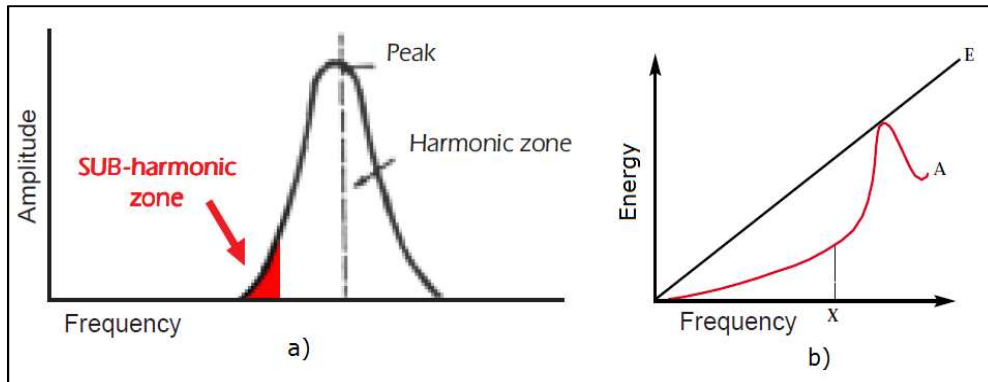


Şekil 2.26. Değişik sönümlenme oranlarında genlikteki değişim ve rezonans

Rezonans; genliğin sonsuza gitmesi şeklinde açıklanmakta olup Şekil 2.26.'da grafikte açıklanmıştır. Tekrarlı yük altındaki yapılarda salınımlar olduğunu bilinmektedir. Salınımlar sırasında yapının ilk durumuna göre yaptığı yer değiştirme miktarına genlik denir. Bu genlik değeri sistemin doğal frekansına eşit olursa, sistemin genliği sonsuza dek artma eğilimi

gösterir. Bu olaya rezonans denir. Cisim rezonans halindeyken sönüm oranı olan “ δ ” sıfırlanır ve sistem şekilde gösterildiği şekilde hareket eder. Aslında sönüm enerji depolamak yerine enerjiyi harcar. Sönüm kuvveti hızla orantılı olduğundan, hareket büyüdükçe enerji daha fazla sönümlenir. Böylece sönüm elemanı tarafından sönümlenen enerji ile kuvvet tarafından beslenen enerjinin eşit olduğu bir noktaya ulaşılır. Bu noktada sistem kendi maksimum genliğine ulaşır ve uygulanan kuvvet aynı kaldığı sürece bu genlikte titremeye devam eder. Eğer hiç sönüm yoksa enerji yutacak hiçbir şey yoktur ve böylece hareket teorik olarak sonsuza gider. Rezonansın genliği artırması sonucunda parça ve yapılar hasara uğrarlar [4].

Titreşimle gerilme gidermede rezonans titreşim gerilme giderme ve harmonik altı titreşimle gerilme giderme olmak üzere iki farklı yöntem vardır. Rezonans titreşim gerilme gidermede parçanın sahip olduğu doğal frekansta titreşim verilerek parçanın rezonansa girmesi sağlanmaktadır. Ancak bu proses kontrollü olarak uygulanamazsa meydana gelen rezonans nedeniyle parça hasar görebilmektedir. İkinci yöntem ise harmonik altı titreşimle gerilme giderme adı verilen yöntemdir. Bu yöntemde, önce metal parçadaki rezonans frekanslarını belirlemek, ardından da parçayı belirlenen rezonans frekanslarının birinin hemen altında titreştirmek öngörülmektedir [26].



Şekil 2.27. a) Rezonans frekansı, b) harmonik altı rezonans bölgesi

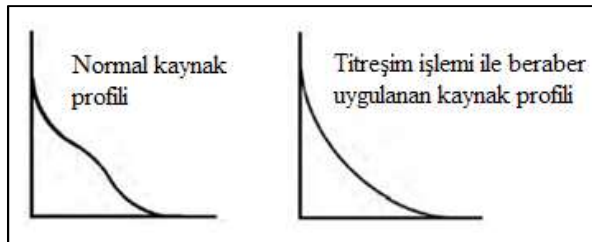
Şekil 2.27.a’da rezonans frekansı ve harmonik altı frekans bölgeleri gösterilmektedir. Şekil 2.27.b’de ise titreşim enerjisi ve frekans arasındaki ilişkiyi anlatmaktadır. E çizgisi lineer olarak artan titreşim enerjisini göstermektedir. A eğrisi ise aynı frekans aralığında titreşim uygulanan metal iş parçasının genlik profil değişimini ifade etmektedir. Titreşim uygulanmaya başladığında, metal parça ilk başta titreşim enerjisine direnç gösterir. Daha

sonra, belirli bir frekansta, enerji direnci kırar ve genlik çok hızlı şekilde artar ve harmonik (rezonans) durum meydana gelir. Bu enerji ile kalıntı gerilmeler azalır [26].

Tüm cisimler doğal harmonik frekansa sahiptirler. Isıl iç gerilmelere sahip parçaların doğal harmonik frekanslardan farklı harmonik frekansları vardır. Bu parçalara harmonik altı (subharmonic) frekanslarda titreşim uygulanırsa, parça ısı gerilmeleri yok edecek enerjiyi absorbe eder. Bu da, harmonik frekanslarını kendi doğal harmonik frekanslarına taşımalarını sağlar. Bu sayede artık gerilmeler azaltılabilir [4].

İki farklı yönteminde ortak noktası öncelikli olarak parçanın doğal frekansının belirlenmesidir. Bu doğal frekans kullanılarak parçaya verilen kuvvet belirlenmekte ve parçanın rezonans seviyesinde ya da rezonans seviyesine yakın bir değerde titreşime maruz kalmasıyla düzensiz durumda olan dislokasyonların enerji absorbe ederek düzenli duruma geçmelerine sebebiyet vererek parçanın içinde bulunan artık gerilmelerin azaltılması hedeflenmektedir [4].

Titreşimle gerilme giderme işlemi sırasında iş parçasında hangi özelliklerin iyileştirilmesinin istenmesi ile bağlantılıdır. İnce sacların kaynağı sırasında oluşan çarpılmaları önlenmek isteniyorsa titreşimle gerilme giderme kaynak sırasında uygulanmaktadır. Fakat kaynak sonrasında malzeme üzerinde oluşan artık gerilmelerin yapı içinde tekrar dağıtılarak, gerilme yığılmaları azaltılmak isteniyorsa titreşimle gerilme giderme işlemi kaynak sonrasında uygulanmaktadır.



Şekil 2.28. Titreşim uygulaması ile kaynak profilindeki fark [4]

Kaynak işleme sırasında, harmonik altı frekans seviyesinde titreşimle gerilme giderme uygulandığında, titreşimler kaynak metalinin bir süre daha sıvı olarak kalmasını sağlar. Kaynak metalinin geç soğuması sonucunda, kaynağın kökten yüzeye kadar katılaşması daha düzgün olur. Bu durum kaynağa iki fayda sağlayacaktır. Birincisi, kaynak yüzey altındaki

katılaşmanın bir kısmı çoktan katılaşmış olacağından, kaynak yüzünde oluşan büzülme kaynaklanmış parçada çok şekil değişimi yaratamayacaktır bu yüzden kaynakta daha az çarpılma olacaktır. İkincisi, kaynak katılaşma sıcaklığına ulaştığında aynı zaman aralığında birden çok katılaşma merkezleri oluşacaktır. Bu da çatlama dayanaklı ince taneli kaynak meydana getirecektir. Özellikle, süneklik ve darbe enerji değerleri sırasıyla %400 ve %75'e kadar artacaktır. Kaynak işlemi yapılırken titreşim işlemi uygulanan yapıdaki kaynak profili değişimi Şekil 2.28.'de görülmektedir [26].

Titreşimle gerilme literatür çalışmaları

Titreşimle gerilme giderme işlemi sırasında, dışarıdan uygulanan kuvvet, parçayı veya konstrüksiyonu titretir. İşlem esnasında, titreşim uygulanan yapının mekanik tepkisi uygulanan dinamik kuvvete, frekans değerine ve malzemenin sönümleme kabiliyetine bağlıdır. Bu değerler çevrimde gerilme-uzama koşullarını değiştirirler. Meydana gelen gerilmeler elastik alan içerisinde kalırlarsa dinamik kuvvetin kaldırılmasından sonra artık gerilme giderilmesinin meydana gelmesi beklenmez. Diğer yandan verilen dinamik kuvvet yerel olarak elastik-plastik sınır arasında kalıyorsa dinamik kuvvetin kaldırılmasından sonra artık gerilmelerin azalması beklenmektedir [27].

S. Kwofie, 2009 yılında yaptığı çalışmada [27], titreşimle gerilmenin matematiksel modellemesini teorik olarak öne sürmüştür. Deneysel çalışmalarla elde edilecek sonuçlar bu modelde bulunan amprik ifadelerle karşılaştırılması gerektiğini ifade etmiştir. Çalışmasında sadece teorik varsayım yapmış olup, deneysel çalışma yapmamıştır. Titreşimle gerilme giderme sonucunda meydana gelecek olan birim şekil değişikliği Eş. 2.9.'daki gibidir.

$$\Delta \epsilon_e = \frac{\Delta \sigma_R}{E} = \frac{\Delta \sigma_{R0} + \sigma_A - \sigma_{ys}}{E} \left[1 - \exp \left(\frac{-8 \epsilon_a f t \theta_0}{\sigma_{ys}} \right) \right] \quad (2.9)$$

Denklemdaki σ_{ys} malzemenin akma gerilmesini göstermektedir. Bu denklem ile herhangi bir çevrim sayısında ya da istenilen zamanda artık gerilmelerin ne kadar azalabileceği belirlenebilecektir. Denklemden de görülebileceği gibi malzemenin akma gerilmesinin yüksek olduğu durumlarda ve soğuk şekil vermeye sertleştirilmiş malzemelerde (çok düşük θ_0 değerlerinde) birim şekil değiştirme farkı az olacağından artık gerilmelerinde azalması az olacaktır. Bu nedenle yüksek dayanımlı malzemelerde titreşimle gerilme giderme

uygulaması artık gerilmeleri kabul edilebilir seviyelere indiremeyeceğinden çok verimli bir uygulama olmamaktadır. Sonuçta titreşimle gerilme giderme harmonik kuvvetler etkisinde meydana gelen çevrime bağlı bir gerilme giderme prosesi olarak belirtilebilir. Denklem de gösterildiği gibi dışarıdan verilen gerilme ile artık gerilmelerin toplamından malzemenin akma gerilmesinin farkı kadar artık gerilme giderme yapabilmektedir [27].

Y.P. Yang, G. Jung ve R. Yancey'in [28] beraber yaptıkları çalışma sonrası 2005 yılında yayınladıkları makalelerinde, kaynak sonrası titreşimle gerilme gidermenin sonlu elemanlar modellemesini yapmışlardır. Sonlu elemanlar çözümlemesine göre, harmonik altı titreşimle gerilme gidermede anahtar rolü genliğin oynadığını ileri sürülmüştür. Çalışmanın diğer çıktısı ise, titreşimle gerilme gidermede zamanın kritik parametre olmadığıdır. Çünkü ilk çevrimde dahi yüksek miktarda artık gerilmelerin giderildiğini öne sürülmektedir. Plastisite modelinde ise artık gerilmelerin çevrim sayısı ile doğru orantılı olarak azaldığı dolayısıyla zamanın artmasının belli bir noktaya kadar artık gerilmeleri azaltacağı savunulmuştur. Ek olarak, yapı üzerindeki kalıntı gerilmeleri azaltmak için, uygun titreşim modunun seçilmesi gerektiği ve optimum mod şeklinin bilgisayar ortamında önceden bulunarak, bu moda uygun olarak titreşim uygulanmasının daha etkin sonuç vereceği savunulmuştur.

2003 yılında yayınlanan makalede, M.C. Sun, Y. H. Sun ve R. K. Wang [29] titreşimle gerilme gidermenin gemicilikte kullanılan Ck 35 ıslah çeliğinden üretilen mil üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Makalede daha önceden artık gerilmelerin giderilmesi için yapılan ısıtma işlemiyle gerilme giderme işleminde maliyetin 30 000 \$, işlem için geçen sürenin ise 10 saat olduğunu, aynı işlemin titreşimle gerilme giderme uygulandığında ise maliyetin ısıtma işleminin % 10'u kadar, işlemi uygulama zamanının ise sadece yarım saat olduğunu vurgulamışlardır. Ek olarak, sağladığı enerji tasarrufu ile çevre dostu sistem olduğu da belirtilmiştir.

Çalışma kapsamında farklı testler uygulanarak parçadaki mekanik özelliklerin değişimi incelemiştir. Öncelikli olarak, iki adet deney numunesi çekme deneyine tabi tutulmuş olup sonuçlar Çizelge 2.2.'de görülmektedir. Çizelge incelendiğinde, akma dayanımı ortalama % 3.1, çekme dayanımı ortalama %7.5 azalmış olup, uzama miktarı ise ortalama %8.3 oranında artmıştır [29].

Çizelge 2.2. TGG Ck35 çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi [29]

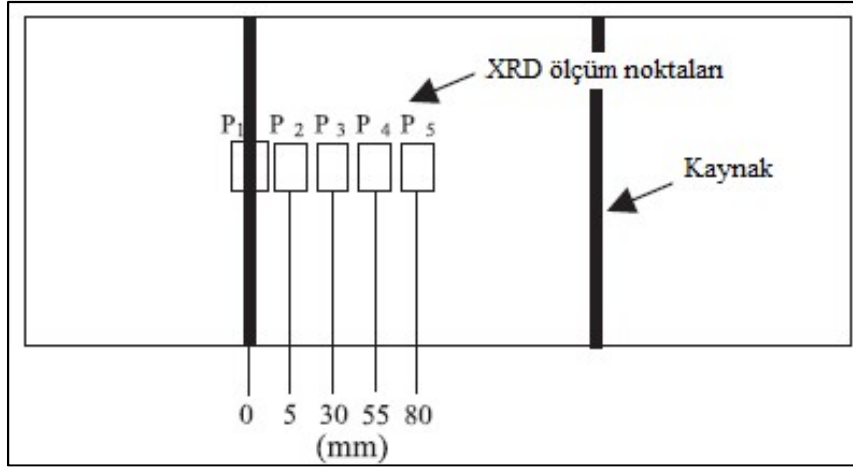
	Deney Numune No	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Uzama
Titreşimle Gerilme Gidermeden Önce	1	325	670	24
	2	320	670	25
Titreşimle Gerilme Gidermeden Sonra	1	310	620	26
	2	315	630	25

Titreşimle gerilme gidermenin kalıntı Ck 35 çeliği üzerindeki artık gerilmelere etkisini incelemek için, deney parçalarında XRD metodu ile kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 2.3’de görülmektedir. Sonuçlara göre kalıntı gerilmeler 80 MPa’a kadar azalarak yarıya düşmektedir.

Çizelge 2.3. Titreşimle gerilme gidermenin Ck35 çeliğinin artık gerilmelere etkisi [29]

Kalıntı gerilmeler (MPa)				
Titreşimle Gerilme Gidermeden Sonra	Deney Numune No			Ortalama
	1	2	3	
	-74	-99	-88	-87
Titreşimle Gerilme Gidermeden Önce	Deney Numune No			Ortalama
	1	2	3	
	-148	-197	-148	-165

M.C. Sun ve arkadaşları [30] 2003 yılında yaptıkları başka bir çalışmada, titreşimle gerilme gidermenin düşük alaşımlı yüksek dayanımlı kaynaklı çelikler üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Çalışma kapsamında, 4mm kalınlığındaki kaynaklı plakalar için D6AC ve D406A çelik kullanılmıştır. Plakalara kaynatılmadan önce 310 °C’de yarım saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Plakalar kaynatıldıktan sonra, 2 dk. titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanmış, daha sonra XRD metodu ile kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Şekil 2.29.’da ölçüm noktaları ve Çizelge 2.4.’de ölçüm sonuçları görülmektedir.



Şekil 2.29. D6AC ve D406A kaynaklı plakalardaki XRD ölçüm noktaları [30]

Çizelge 2.4. Kaynaklı plakalarda kalıntı gerilme ölçüm sonuçları [30]

Titreşimle Gerilme Gidermeden Önce Kalıntı Gerilmeler (MPa)						
Malzeme	Numune No	P1	P2	P3	P4	P5
D6AC	1	-98.6	-25	-49.3	-49	-25
D6AC	2	-64.1	-54.2	9.9	-25	14.8
D406A	3	78.9	-5	-74	-9.9	9.8
D406A	4	98.6	-34.5	-25	-25	-25
Titreşimle Gerilme Gidermeden Sonra Kalıntı Gerilmeler (MPa)						
Malzeme	Numune No	P1	P2	P3	P4	P5
D6AC	1	-49	0	-13.8	-23.6	24.6
D6AC	2	24.6	-24.6	24.6	24.6	0
D406A	3	9.6	19.7	9.9	0	-4.9
D406A	4	73.9	24.6	0	24.6	25

Testler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, çelik plaka üzerindeki ölçüm noktalarının çoğunda artık gerilmelerin o noktasına düştüğü görülmüştür. İki nokta dışında, gerilmeler ± 25 MPa azaldığı bilgisine ulaşılmıştır. Bu azalma miktarı ısıtılma işlemde elde edilen azalma miktarına yakın olduğu, bu yüzden uygulaması daha kolay olan bu yöntemin ısıtılma işlemin yerini alabileceği vurgulanmıştır. Çalışmadan çıkarılan diğer sonuç ise, titreşimle gerilme giderme uygulamasındaki en önemli nokta, işlem uygulanacak parçada titreşim etkisinin en yüksek olmasının sağlanması olduğu belirtilmiştir [30].

2004 yılında ise Çin’de raylarda titreşim gerilme giderme uygulaması yapılmıştır. Raylı yapılarda ışık işlem veya kaynaktan önce ön ısıtma yöntemi pratik yöntem olmadığı için alternatif metot olan titreşimle gerilme giderme denenmiştir. Aynı zamanda bu yöntem ile çarpılma, yüzeyde oksitlenme ve içyapının değişmesi gibi ısıtma işleminin negatif etkilerinden kaçınıldığı vurgulanmıştır. Test çalışmalarına kaynaklı yapıda, kaynaktan önce ve kaynaktan sonra kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde ortalama asal gerilmelerin, titreşimle gerilme giderme sonrasında %30 oranında düştüğü sonucuna ulaşılmıştır [31].

Rao, Wang ve Chen [32] 2007 yılında yaptıkları çalışmada 314L paslanmaz çelikten üretilmiş plakalar üzerinde yaptıkları deneylerin sonuçlarını açıklamışlardır. Makalede daha önceden yapılmış çalışmalarda bulunan sonuçlardan yola çıkılarak, periyodik yük altında kalıntı gerilme azalmasının matematiksel denklemi gösterilmiştir. Bu ifade Eş. 2.10.’da matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\Delta\sigma = 1.05 \times 10^{-5} \times K \times E \times \sigma_d \times \left[1 - \exp\left(-1.13642 \times \frac{N}{\sigma_d}\right) \right] \quad (2.10)$$

Bu denklemde; σ_d uygulanan dinamik stresi, E dinamik elastikiyet modülünü, N çevrim sayısını ve K artık gerilmenin malzemenin akma gerilmesine oranı göstermektedir. Bu denklemde K değeri 1 olarak alınabileceği belirtilmiştir. Bu denklem ile titreşimle gerilme gidermenin etkinliğinin belirlenebileceği belirtilmiştir. Test aşamasında 3 adet deney numunesine sırasıyla ± 30 , ± 60 ve ± 90 MPa genliğinde ve yapının rezonans frekansında, 600 döngü uygulanmış olup daha sonra delik delme yöntemi ile belirlenen noktalardan kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır [32].

Çizelge 2.5. Periyodik yük altında artık gerilme miktarındaki değişimler [32]

Dinamik Gerilme Genliği (MPa)	Ölçülen Artık Gerilme Değişimi (MPa)	Hesaplanan Artık Gerilme Değişimi (MPa)	Hata Oranı (%)
± 30	56	58	-3
± 60	134	117	13
± 90	197	176	11

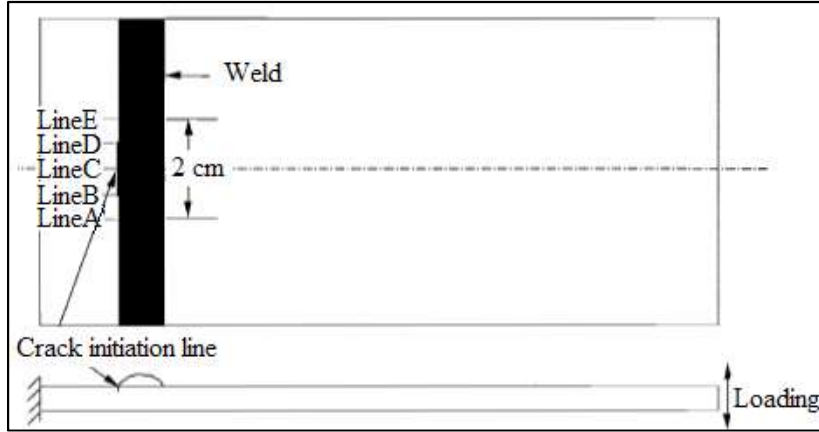
Çizelge 2.5.'de 600 çevrim için bulunan teorik çevrimlerle pratik çevrimler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yaklaşık olarak 35 MPa kalıntı gerilme azalması oluşmuştur. Çizelge 2.5.'den ölçülen ve hesaplanan değer arasında maksimum %13 fark olduğu görülmektedir [32].

Titreşimle gerilme giderme cihazının patentinin sahibi üretici firma tarafından, A36 çeliğine yaptığı testlerde kaynaklı yapı üzerindeki farklı gerilme giderme tekniklerinin etkisini incelemiştir. Test numunelerine, çekme ve darbe testleri uygulanmış olup sonuçları Çizelge 2.6.'da görülmektedir. Çekme deneyi sonuçlarına göre kaynak sonrası titreşimle gerilme işlemi uygulanan numunede çekme dayanımı azalmasına rağmen ITAB bölgesinde darbe enerji değeri oldukça artmıştır. Isıl işlem uygulanan numunede çekme dayanımı ve darbe enerji değerleri en çok azalmıştır [25].

Çizelge 2.6. Periyodik yük altında artık gerilme miktarındaki değişimler [25]

A36 Çeliği	Normal	Ön ısıtma	Isıl İşlem	TGG
Çekme Dayanımı	532.62	486.08	460	529
Darbe enerji değeri (J) Kaynak bölgesi	49.2	43.6	29.2	43
Darbe enerji değeri (J) ITAB	8.7	8.2	19.11	16.3

2001 yılında, Munsı ve arkadaşları [33] titreşimle gerilme gidermenin yorulma ömrü üzerine etkisi üzerine yaptıkları çalışmayı yayınlamışlardır. Test çalışmalarını akma dayanımı 607 MPa olan çelik malzeme üzerinde yapmışlardır. Deney çalışmalarını yaptıkları test sistemi Şekil 2.30.'da görülmektedir.



Şekil 2.30. Titreşimle gerilme giderme uygulaması ve yorulma test cihazı [33]

Numunelere dinamik olarak uygulanan yük gerinim ölçer ile ölçülmüş olup kalıntı gerilme ölçümleri XRD ile yapılmıştır. 3 farklı parametre altında yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan testler ve titreşimle gerilme giderme arasındaki farklılıklar Çizelge 2.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. Çalışmalardaki deneyler ve titreşim uygulaması farklılıkları [33]

Deney	Test		Titreşim Uygulaması		
	Genlik	Frekans	Genlik	Süre	Frekans
1. Deney	± 205 MPa	25 Hz	± 365 MPa	5 dk.	25 Hz
2. Deney	± 205 MPa	25 Hz	± 370 MPa	5 dk.	25 Hz
3. Deney	± 165 MPa	25 Hz	± 370 MPa	5 dk.	25 Hz

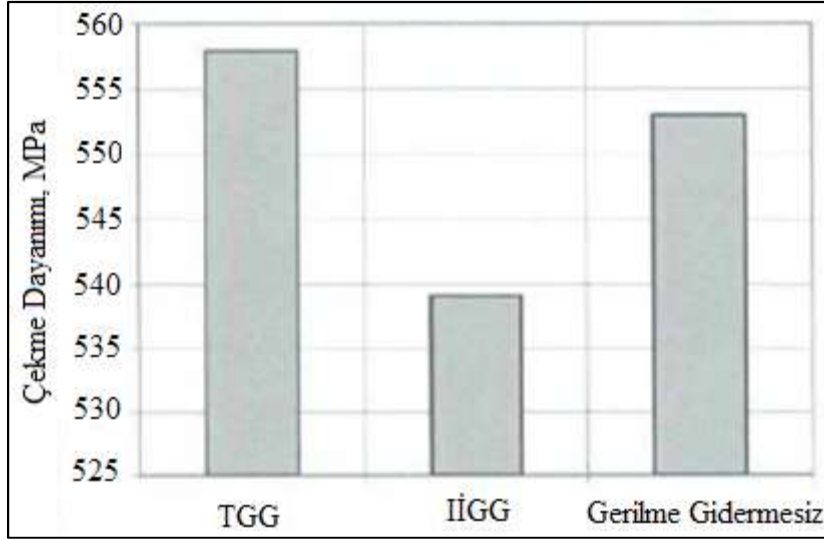
Çalışma sonucunda, titreşimle gerilme giderme yorulma ömrünü arttırdığı görülmektedir. İlk deneyde ısıtılmış işlem uygulanmış numunelerin ömürleri, herhangi bir işlem uygulanmamış numunelerin ömürlerinden düşüktür. 2. Deneyde numunelere titreşim 1. Deneye göre daha yüksek genlikte uygulanmıştır. Yüksek genlikte titreşim uygulaması sonucu yorulma ömrü 1. Deneye göre artmıştır. Deney sonuçları Çizelge 2.8.'de görülmektedir [33].

Çizelge 2.8. Deneyler ve yorulma sonuçları [33]

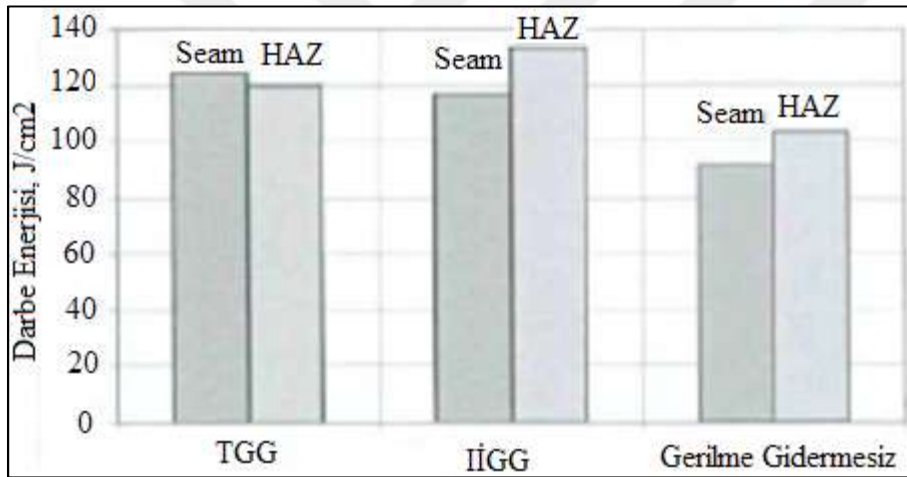
1. Deney			
Test	İşlemsiz	Titreşimle gerilme giderme	Isıl işlem
En yüksek döngü	279 000	412 900	212 500
En düşük döngü	233 000	238 500	85 170
Ortalama döngü	260 800	304 600	147 000
2. Deney			
En yüksek döngü	282 800	414 000	
En düşük döngü	216 200	256 000	
Ortalama döngü	241 100	314 500	
3. Deney			
En yüksek döngü	391 300	500 900	
En düşük döngü	307 300	298 500	
Ortalama döngü	346 800	408 100	

2008 yılında yapılan ve titreşim konferansında sunulan çalışmada, St52 (S355J2G3) malzemesi kullanılarak üretilen kaynaklı numunelerdeki mekanik özellik değişimlerin ısıtma işlemle gerilme giderme ve titreşimle gerilme giderme yöntemine göre değişimlerini incelemişlerdir. Şekil 2.31.'de gerilme giderme işlemleri uygulandıktan sonra numunelerin çekme dayanımındaki farklılıklar görülmektedir. Titreşimle gerilme giderme uygulanan numunenin çekme dayanımı, gerilme gidermesiz numunenin çekme dayanımı ile kıyaslandığında 5 MPa artış görülmektedir. Isıl işlemle gerilme giderme uygulanan numunenin çekme dayanımı ile gerilme gidermesiz numunenin çekme dayanımı karşılaştırıldığında ise yaklaşık 15 MPa azalma görülmektedir [36].

Şekil 2.32.'de üç parametrenin, kaynak bölgeleri ve ITAB için darbe dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlarda kaynak dikişi (Seam) ve ITAB (HAZ) için iki gerilme giderme yönteminin de darbe dayanımını arttırdığı görülmektedir [36].



Şekil 2.31. Deney numuneleri çekme deneyi sonuçları [36]



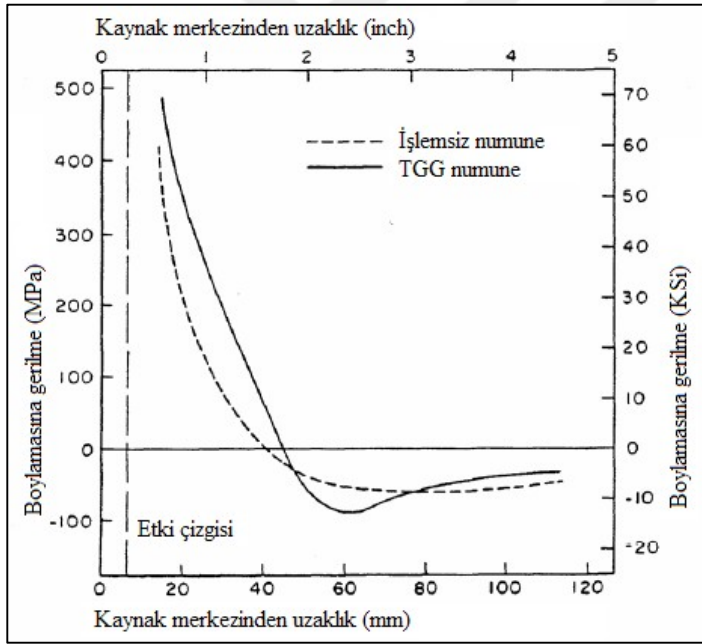
Şekil 2.32. Deney numuneleri darbe deneyi sonuçları [36]

2012 yılında yapılan çalışmada, kaynaklı parçalarda kalıntı gerilme giderme yöntemlerinden titreşimle gerilme giderme ve ısıtma işlemi kullanılarak, bu yöntemlerin malzeme özelliklerindeki değişimleri incelenmiştir. Yapılan test çalışmalarında P355GH malzemesi tercih edilmiş ve 12 mm kalınlığındaki plakalar toz altı kaynak ile birleştirilmişlerdir. Titreşimle gerilme giderme uygulanan numunelere, 3 kez 10 dakika ara ile 15 dakika titreşim uygulanmıştır. Diğer numunelere ise, yaklaşık 3 saat süren ve maksimum 600 °C’de gerilme giderme işlemi uygulanmıştır [35].

Uygulamalar sonucunda mikro yapılar incelenmiş olup sırası ile ITAB ve ana metal için makro yapılar elde edilmiştir. Makro yapı görüntüleri 500 kez büyütülerek alınmıştır.

Gerilme giderme tavlaması sırasında kristal yapının değişime uğramadığı bilinmektedir. Isı ile etkilenmiş bölge, ana metal için tanecik yapısı genellikle keskin ve açılı kenarlıdır. Bu bölge ısıtıl işlem sonrasında keskin köşeler çok az oranda azalmış olup, taneler daha düzenli olmuştur. Titreşimle gerilme işlemi sonrasında taneler düzenli konuma geçmiş, keskin kenarlar yumuşamış ve tane boyutunun ise küçüldüğü görülmektedir. Ana metal makro yapısı incelendiğinde tane yapılarında çok fark görülmemektedir. [35].

1982 yılında yapılan çalışmada, ısıtıl işlem ve titreşimle gerilme giderme işlemleri sonrası kaynaklı yapının mekanik özellikleri ve kalıntı gerilme değişimi karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında ASTM A36 çeliği kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikli olarak çekme testleri yapılmış olup titreşimle gerilme giderme uygulanan numunelerin akma ve çekme dayanımlarının az oranda arttığı görülmüştür. TGG işlemi sonrasında kalıntı gerilme değişimi de incelenmiş olup Şekil 2.33.'te görülmektedir [37].



Şekil 2.33. İşlemsiz numune ve TGG numune kalıntı gerilme değişimi [37]

Aynı çalışmada ısıtıl işlem ve titreşimle gerilme gidermesi uygulanmış kaynaklı plakalara ait mikro yapı görüntüleri de incelenmiştir. Mikro yapı görüntüleri karşılaştırıldığında dislokasyonların yoğunluğundaki artış fark edilmektedir. Titreşimle gerilme giderme sonrasında dislokasyon sayısındaki artış, uygulama sonucunda malzemenin plastik deformasyona uğradığını kanıtlamakta ve titreşimle gerilme giderme mekanizmasına ışık tutmaktadır [37].

Çalışma kapsamında kaynak işlemi sonrasında kalıntı gerilmeler azaltılarak yapının mekanik özelliklerini incelemek için, titreşimle gerilme giderme uygulanmıştır. Literatürde bu kapsamda farklı metallere, farklı kalınlıklarda ve farklı kaynak metotlarında uygulanan çalışmalar mevcuttur. Titreşimle gerilme gidermenin faydaları, kısıtlamaları ve uygulamaları hakkında yapılan birçok çalışma mevcuttur fakat bu araştırmalar sayı ve nitelik bakımından ısıtılma işlemle gerilme gidermenin sahip olduğu araştırmaların kadar fazla değildir. Titreşimle gerilme gidermenin yorulma ömrünü artırdığı hakkında çok fazla akademik makaleye rastlanılmamıştır ancak bu işlemin çekme gerilmesini artırması nedeniyle yorulma dayanımını da artıracak bilinmektedir. Fakat uygulamanın malzeme sönümle kabiliyeti, uygulanan frekans ve dışarıdan uygulanan dinamik kuvvet önemli ve değişken olduğu için, uygulamanın yorulmaya etkisi her malzeme ve yapı üzerinde farklılık gösterecektir. Tez kapsamında, S355J2 çeliğine gazaltı kaynak işlemi sonrasında uygulanan titreşimle gerilme işlemi sonucunda yorulma dayanımındaki farklılıklar ortaya konmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel çalışmalar sırasında kullanılan malzeme, uygulanan testler, testler sırasında kullanılan deney cihaz/ekipmanları ve seçilen test parametreleri anlatılmıştır.

3.1. Malzeme

Bu çalışmada deney malzemesi olarak, sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan ve eski adı St52-3 olan, S355J2 çeliği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemenin üreticiye ait kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de verilmiştir [34].

Çizelge 3.1. Deney parçasının kimyasal bileşeni

Standart Karşılığı		Kimyasal Bileşimi					
Standart	Kalite	C	Mn	P	S	Si	Cu
EN 10025-2	S355J2	0.20	1.6	0.025	0.025	0.55	0.55

Çizelge 3.2. Deney parçasının mekanik özellikleri

Standart Karşılığı		Mekanik Özellikler		
Standart	Kalite	σ_y (N/mm ²)	σ_{ut} (N/mm ²)	A(%) min.
EN 10025-2	S355J2	355	470-630	20

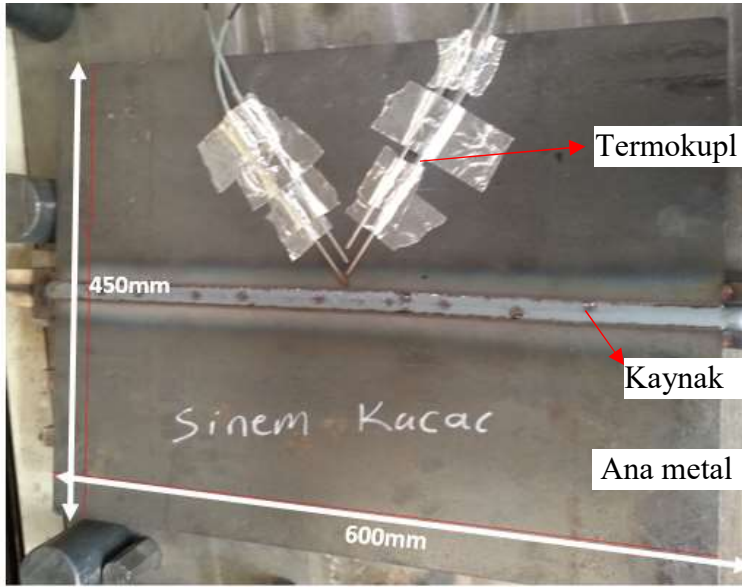
3.2. Kaynak İşleminin Uygulanması

Tüm test numunelerinde plaka kalınlığı 10 mm olarak alınmıştır. Uygulanan gazaltı kaynağı parametreleri Çizelge 3.3.'teki gibidir.

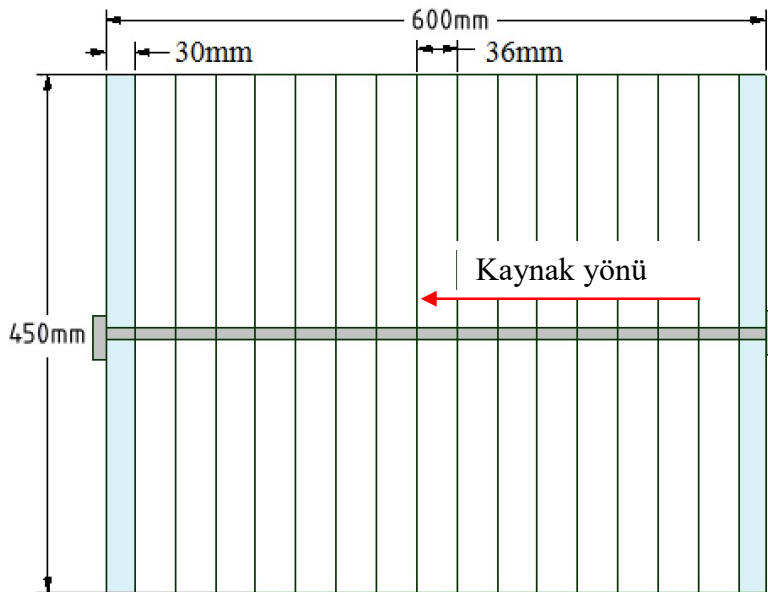
Çizelge 3.3. Kaynak parametreleri

Kaynak Robotu Hızı	25cm/dk.
Kaynak Tel Hızı	10m/dk.
Kaynak Akımı	270-280 A
Kaynak Gerilimi	17-28 V

Çekme ve yorulma deney numunelerinin tümünün aynı özelliklere sahip olması için öncelikle 600mm x 225mm x 10mm boyutunda büyük plakalar kaynatılmış daha sonra büyük plakalardan test numuneleri çıkartılmıştır, uygulanan işlem Şekil 3.1 ve Resim 3.1’de görülmektedir. Plakalara, kaynatılmadan önce 30 derecelik V kaynak ağzı açılmıştır. Kaynak başlangıç ve bitiş noktaları plaka dışında yapılmış olup, standartta belirtildiği gibi kenarlarda mavi ile gösterilen bölgeler kaynak hatası barındırabileceği hurdaya ayrılmıştır.

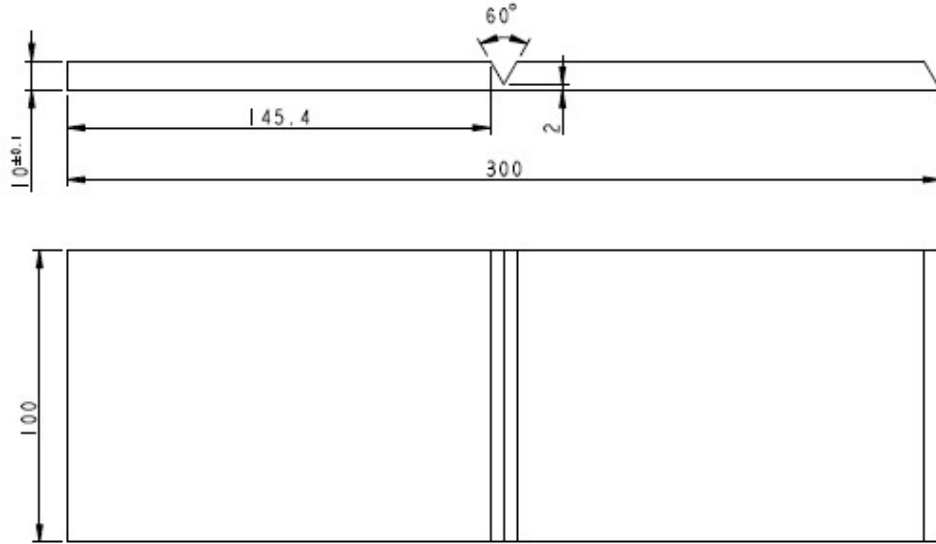


Resim 3.1. Deney numuneleri ön hazırlık aşaması – plaka kaynağı

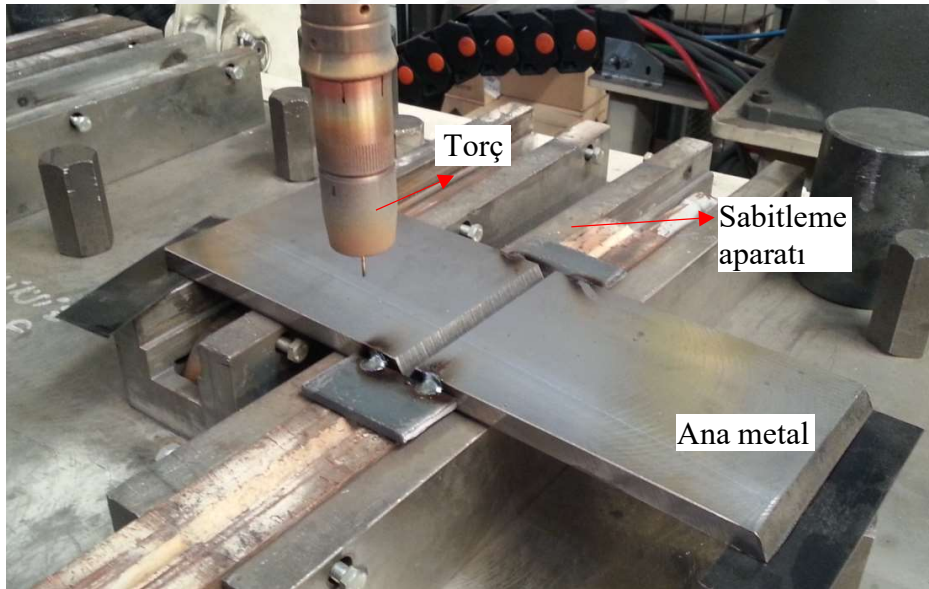


Şekil 3.1. Kaynaklı plakadan yorulma deney numunelerinin çıkartılması

Sertlik ve kalıntı gerilmeleri ölçümleri için farklı plakalar hazırlanmış olup Şekil 3.2.'de görülmektedir. Sertlik ve kalıntı gerilme ölçümlerinin daha düzgün yapılması için plakaya 60 derecelik V kanal açılmıştır. Plaka kaynağı Resim 3.2.'de görülmektedir.



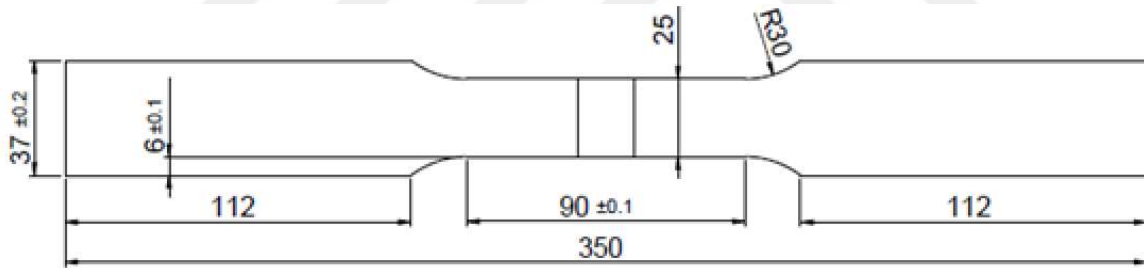
Şekil 3.2. V Kanal açılmış plaka (ölçüler mm'dir.)



Resim 3.2. Kalıntı gerilme ve sertlik testleri plakası kaynağı

3.3. Çekme Deneyi

Kuvvet ve şekil değiştirme arasındaki bağıntıların incelenmesi bakımından en basit deney çekme deneyidir. Çekme deneyi; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarının belirlenmesi, mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzeme seçimi amacıyla yapılır. Gazaltı kaynağı ile birleştirilen plakalar TS 287 EN 895 standardına uygun olarak, numunelerin kaynak sonrası mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla soğuk çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Numuneler, önce kaynatılan büyük plakalardan, Şekil 3.1., lazer ile kesilerek çıkartılmıştır. Kesme işlemi sırasında ısı etkisini en aza indirmek için, standartta belirtildiği gibi test numunesinin kenarlarından minimum 8 mm bırakılarak kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler çekme deneyinde, numunelerin sağlaması gereken ölçüler standartta belirtilmiştir. 10 mm kalınlığında deney numuneleri standartta belirtilen ölçülere göre tezgahta işlenerek son halini almışlardır. Standartta göre işlenen ve çekme testine tabi tutulan parçaların teknik resmi Şekil 3.3., üretilen parçalar ise Resim 3.3.'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Kaynaklı çekme numunesi teknik resmi (ölçüler mm'dir.)



Resim 3.3. Kaynaklı çekme numuneleri

Numuneler üretildikten sonra, 3 adedine titreşimle gerilme giderme uygulanmıştır. Titreşimle gerilme giderme uygulanmış ve herhangi bir işlem yapılmamış olmak üzere toplam 6 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme deneyleri, 250 kN'luk yük kapasitesine sahip Zwick marka çekme cihazında yapılmıştır. Her parametre için üç numune kullanılarak, değerlerin ortalamaları alınmış ve çekme diyagramları hazırlanmıştır.

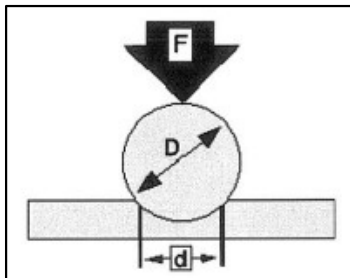
3.4. Sertlik Testi

Sertlik ölçümü ile malzemenin plastik deformasyona direnci belirlenir. Sertlik testi ile bir malzemenin sertliği ile mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki bulunur. Çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik ile doğru orantılıdır; dolayısıyla, yapılan basit sertlik ölçmesi sonucunda malzemenin mukavemeti hakkında fikir edinilir. Metalik malzemelerde sertlik ve çekme dayanımı arasındaki bağıntı Eş. 3.1.'de gösterilmiştir.

$$\sigma_u \text{ (kg/mm}^2\text{)} = 0.35 \times BSD \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

Sertlik değerini elde etmek için, özel biçimli küçük çentikleyici, sertlik değeri ölçülmek istenen numune yüzeyine uygulanır ve daha sonra örnek yüzeyinde oluşan çentiğin büyüklüğüne veya derinliğine bağlı olarak sertlik değeri belirlenir. Dört standart test metodu mevcut olup bunlar; Brinell, Vickers, Knoop ve Rockwell'dir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde

Brinell Metoduna göre deneyler yapılmıştır. Brinell sertlik deneyinde bilye kullanılır. Bilinen kuvvetin oluşan izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri elde edilir. Şekil 3.4.'de Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.4. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi

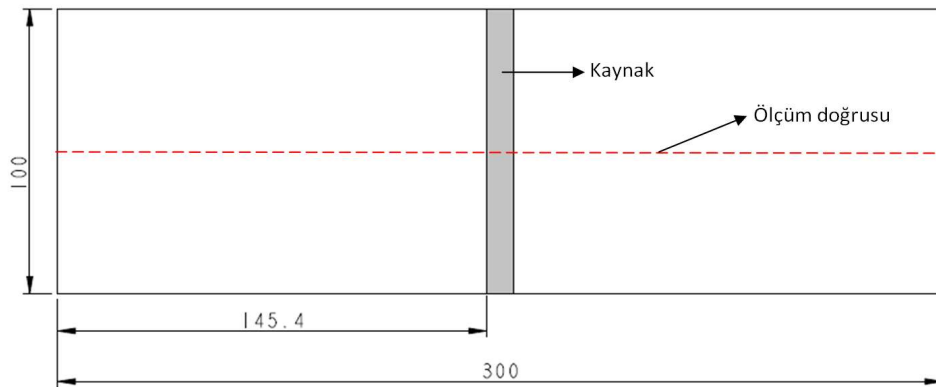
Brinell sertlik değeri, Eş. 3.2. ile hesaplanır. Bu bağıntıda yer alan F uygulanan yükü (kg), D bilye çapını (mm) ve d ise iz çapını (mm) gösterir. Standart deney koşullarında çapı 10 mm olan bilye kullanılır. Ancak bazı durumlarda çapları 10 mm'den daha küçük olan (örneğin 1,25, 2,5 ve 5,0 mm) bilye biçimindeki uçlarda kullanılır.

$$BSD = \frac{F}{y} = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (3.2)$$

Sertlik ölçümleri alınırken dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır;

- Sertlik ölçülecek yüzeyler düzgün ve temiz olmalı.
- Sertlik ölçme yapılırken kullanılan yöntem ne olursa olsun, numunelerin üzerinde birkaç (en az üç) ölçme yapıp ortalaması alınmalıdır.
- Ölçülen izler arasında en az 2.5-3.0 iz çapı kadar mesafe olmalıdır.
- Ayrıca izler kenarlardan da 4 iz çapı kadar içeride olmalıdır.

Sertlik ölçümleri, DHT 100 Hardness Tester marka portatif sertlik cihazında, Brinell cinsinde yapılmıştır. Sertlik ölçümleri kaynak yapılan plakanın tam orta ekseninden, bir hat boyunca kaynak kesitine dik olacak şekilde yaklaşık olarak 1 mm aralıklarla alınmıştır. Ölçümleri kaynaklı plakanın hem ön ve hem de arka yüzeyinden alınmıştır. Sertlik ölçüm doğrultusu ve noktaları Şekil 3.5.'te görülmektedir. Daha sonra aynı plakalara, kaynak sonrası titreşimle gerilme giderme uygulanmış ve ölçümler tekrarlanmıştır. Her deney için 3 numuneden ölçümler alınmıştır. Kaynağın ön ve arka yüzeyinden toplanan ortalama sertlik değerleri, iki parametre için karşılaştırılmıştır.

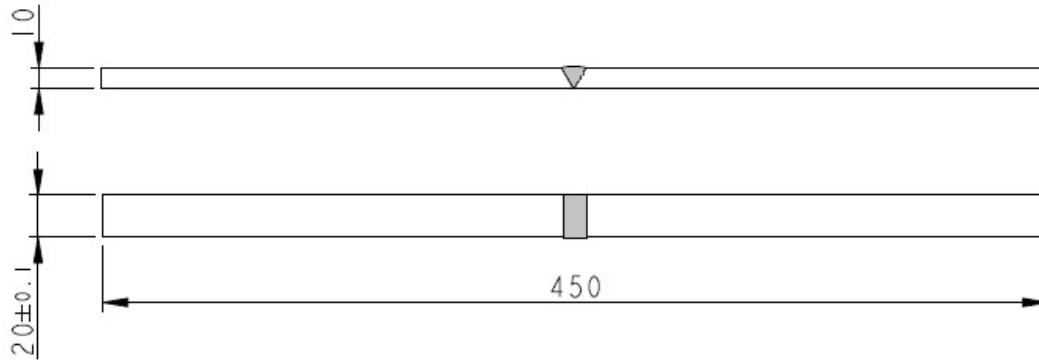


Şekil 3.5. Sertlik ölçüm doğrultusu ve noktaları (ölçüler mm'dir.)

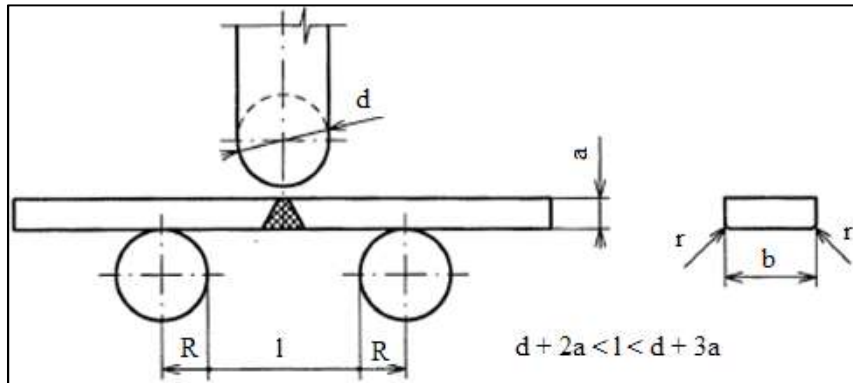
3.5. Eğme Testi

Eğme deneyi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğme deneyi için standart tanımlarına bakılacak olursa; iki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanır.

Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu yöntemlerde amaç, malzemeyi çatlatıncaya kadar tek yönde eğmektir. Sünekliği iyi olan malzemeler 180 derece katlanmalarına rağmen çatlama göstermezler. Eğme deneyi sonucunda, malzemenin eğme momenti (M), eğilme dayanımı (σ), esneklik modülü (E) ve eğilme miktarı (δ) gibi değerler hesaplanabilir. Eğme deney numunesi standartlara uygun olarak, Şekil 3.6.'daki gibi hazırlanmış olup Şekil 3.7.'dekine göre ölçüler belirlenerek statik eğme testi yapılmıştır.



Şekil 3.6. Eğme ve 3 nokta eğme yorulma deney numunesi (ölçüler mm'dir.)



Şekil 3.7. Eğme testi standardı [38]

3.6. Yorulma Testi

Değişken yüklere maruz kalan malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için yorulma deneyleri yapılmaktadır. Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, numuneye uyguladıkları gerilme şekline göre 4 ana grupta toplamak mümkündür.

- Eksenel çekme – basma gerilmeleri uygulayan cihazlar
- Eğme gerilmesi uygulayan cihazlar
- Burma gerilmesi uygulayan cihazlar
- Bileşik gerilme uygulayan cihazlar

Bu cihaz grubu içerisinde en çok kullanılan çalışma prensibi basit olan eğme gerilmesi uygulayan cihazlardır. Malzemesi deneye tabi tutulacak parça çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında 3 nokta eğme yorulma cihazı seçilmiştir.

Bu deneyler için Gazi Üniversitesi bünyesinde İnşaat Mühendisliği laboratuvarındaki MST 322 Test Frame cihazı kullanılmıştır. Cihaz Kapasitesi 100 kN olup 1-10 Hz. frekans aralığında çalışabilmektedir. Yorulma testlerine başlamadan önce statik eğme deneyi yapılmış olup, elde edilen eğriden akma dayanımına göre uygulanacak yükler belirlenmiştir. Belirlenen 4 farklı yük, $R=0.9$ oranında ve 6 Hz. frekansta numunelere uygulanmıştır. Yorulma testleri, farklı yükler altında titreşimle gerilme gidermeli ve gerilme gidermesiz numunelere yapılmıştır. Deney numuneleri ölçüleri standarda uygun olarak Şekil 3.6.'daki gibi hazırlanmıştır.

3.7. Manyetik Barkhausen Yöntemi İle Kalıntı Gerilme Ölçümü

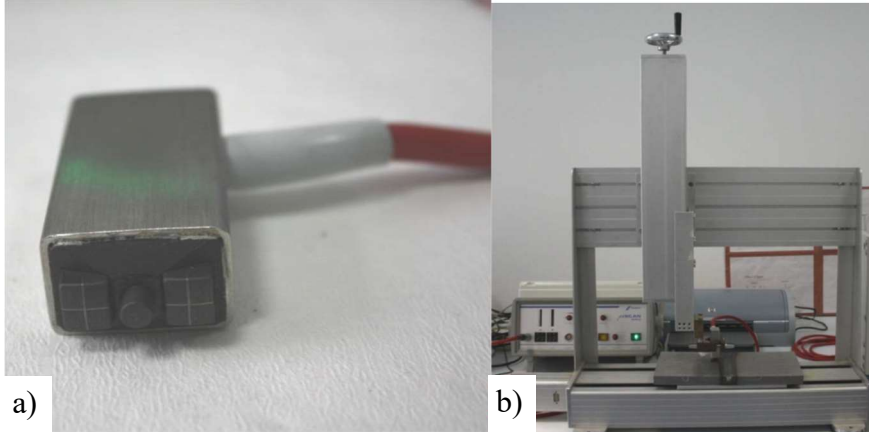
Gerilme ölçümleri “Rollscan - µscan 500-2” cihazı, Resim 3.4. ve S1-138-13-01 uç kullanılarak, Resim 3.5.a, yapılmıştır. Kaynaklı plaka üzerinde yapılan ölçümün sürekli olması için, ölçüm sırasında kullanılan uç sistemi hareket ettiren ettirebilen platforma bağlanmıştır. Numuneler, yaklaşık 4.5 cm/sn. sabit hızda kaynağa dik, x yönünde hareket

edebilen bu platforma bağlanmışlardır. Her ölçümde ucun test plakasına tamamen temas etmesi sağlanmıştır. Ölçümler plakanın ön ve arka yüzünden yapılmıştır.

Ölçümlerin düzgün olabilmesi ölçüm yapılacak plakanın yüzey pürüzlüğünün ve temizliğinin iyi olması gerekmektedir. Manyetik barkhausen gürültüsü ölçümü sırasında 125 Hz sinüsial manyetik alan kullanılmıştır. Toplanan Barkhausen sinyalleri 70-200 kHz aralığında toplanmış ve 10 dB ile yükseltilmiştir. Daha sonra, kalıntı gerilme sonuçları elde edilmesi için sonuçlar Rollscan bilgisayar yazılımı ile analiz edilmiştir.



Resim 3.4. Manyetik Barkhausen gürültüsü ölçüm cihazı [6]



Resim 3.5. Manyetik Barkhausen Gürültüsü Ölçüm Ucu (a) ve Hareketli Platform (b) [6]

3.8. Titreşimle Gerilme Giderme Uygulamaları

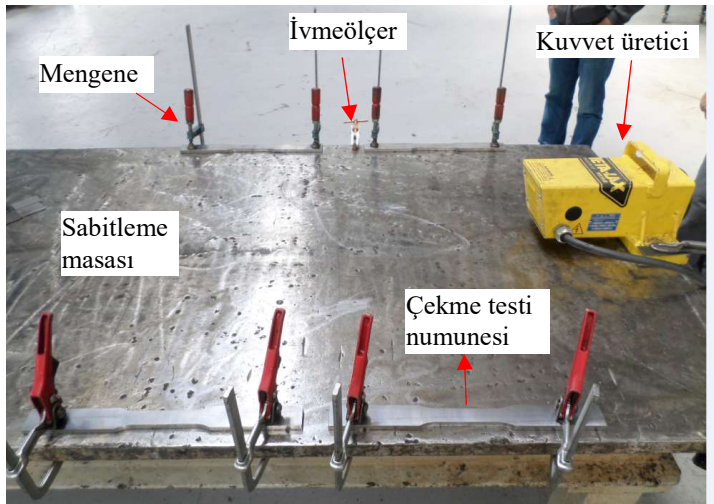
Titreşim gerilme giderme cihazı üç kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar, kuvvet üretici, transduser ve kontrol kısımlarıdır. Kuvvet üretici kısımda titreşime neden olan kuvvet üretilmektedir. Bu bölümde yapılan ayarlamalar ile parçaya maksimum kuvvet

uygulanabilir. Transduser kısmında, ölçülen fiziksel özellik, miktar ve koşullar kullanılabilir elektriksel miktara dönüştürülür. Yapıya düzenli harmonik sinyaller göndermektedir. Kontrol kısmı ise, transduserden alınan bilgileri kontrol etmektedir. Bu bölümde iki farklı işlem yapılmaktadır. Bunlar, transduser bölümünden alınan ivme ölçümü verilerini toplamak ve elde edilen dataları değerlendirerek kuvvet üreticinin sisteme uyguladığı kuvvet miktarının istenen seviyelerde kalmasını sağlamaktır. Cihazın kısımları Şekil 3.6.'da görülmektedir.

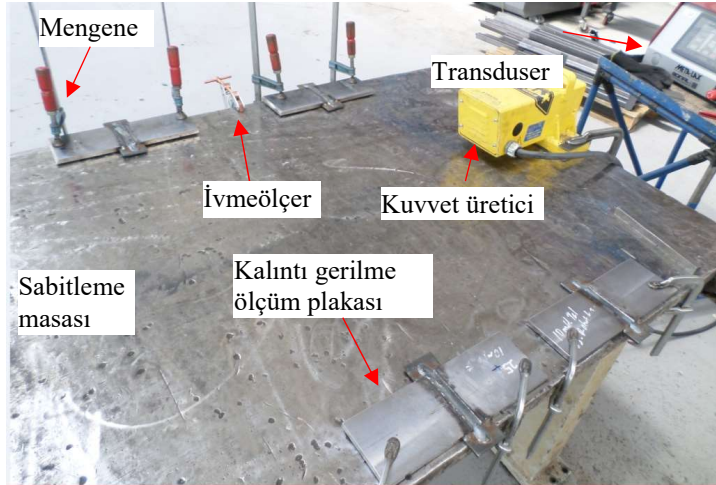


Resim 3.6. TGG cihazı ve kısımları (a) Kuvvet üretici kısmı (b) Transduser kısmı

Titreşimle gerilme giderme cihazı, kullanım alanlarına ve maliyetine göre manuel, yarı-otomatik ve otomatik olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında manuel sistem olan Meta-lax Model 2020 kullanılmıştır. Bu sistemde sadece frekans kontrolü yapılmakta olup bilgisayar kontrolü bulunmamaktadır. Titreşimle gerilme giderme cihazının kuvvet üretici kısmı, işlem yapılmak istenen yapıya doğrudan bağlanmaktadır. Resim 3.7. ve Resim 3.8.'de test numuneleri ve cihaz görülmektedir.



Resim 3.7. Çekme testi numuneleri kalıntı gerilme giderme işlemi uygulaması



Resim 3.8. Kalıntı gerilme ölçümü plakalarına kalıntı gerilme giderme işlemi uygulaması

Numuneler ve kuvvet üretici sabitlendikten sonra ikinci aşama titreşimle gerilme giderme uygulanmasıdır. Aynı firma tarafından üretilen otomatik sistemlerde malzeme boyutları, ağırlık ve operasyon modu seçenekleri programa tanıtılmakta ve sistem tarafından uygulanacak frekans ve frekans süreleri program tarafından hesaplanarak uygulama yapılmaktadır. Manuel sistemlerde uygulanacak frekans ve frekans süreleri tecrübelerle dayanarak belirlenmiştir. Test numunelerine uygulanan kalıntı gerilme giderme işlemi aynı sabitleme masasında uygulanmıştır. Her bir test numunesine aynı oranda etki etmesi için her test grubuna ayrı olarak titreşimle gerilme giderme uygulanmıştır. Uygulama 90 Hz. frekansta ve yarım saat süre ile uygulanmıştır.



4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmaları kapsamında, 10 mm kalınlığındaki kaynaklı plakalarda kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin azaltılması için titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanmış ve bu yöntemin S355J2 çeliği üzerindeki kalıntı gerilmelerine ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Öncelikli olarak, kalıntı gerilme giderme uygulama yönteminin test numunelerinin elastik ve plastik özelliklerindeki değişimin incelenmesi için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme testleri 3'er adet numuneye uygulanmış ve ortalama değerleri incelenmiştir. Gerilme gidermesiz ve titreşimle gerilme giderme uygulanmış numunelerin çekme deneyi nümerik sonuçları sırası ile Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de görülmektedir. Numunelerin ortalama değerlerine ait karşılaştırma tabloları incelendiğinde TGG sonrasında numunelerin çekme, akma ve elastisite modül dayanımlarının arttığı görülmektedir. Deney yapılan numunelerin ortalamalarının, elastisite modül, akma ve çekme sonuçları sırası ile Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te görülebilir.

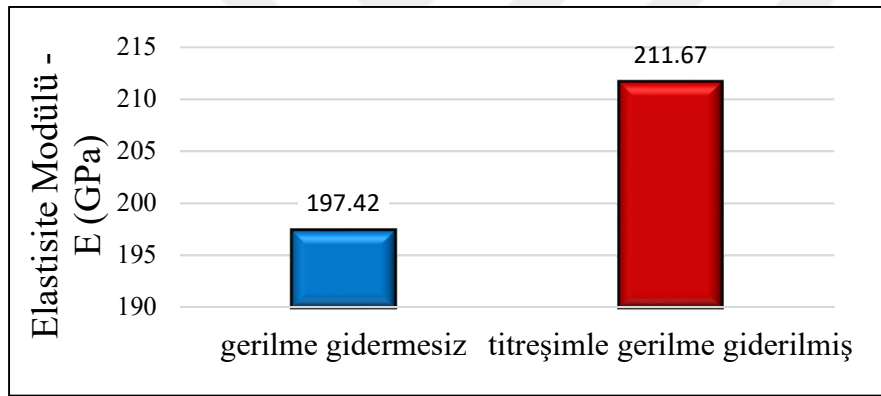
Herhangi bir gerilme giderme işlemi uygulanmamış kaynaklı plakalarda ortalama akma dayanımı 398 MPa iken, titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanan plakaların ortalama akma dayanımı 404 MPa'a yükselmiştir. Ortalama akma dayanımındaki artış % 0.016'dır. Titreşimle gerilme giderme uygulaması sonrası test parçalarındaki kopma dayanımı 551 MPa'dan 554 MPa'a yükselmiştir. Elastisite modülündeki artış oranı %7,1 olup, ortalama değerler 197 GPa'dan 211 GPa'a yükselmiştir. Titreşimle gerilme giderme uygulaması ile parçanın akma ve kopma değerlerinde küçük oranda artışlar olmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde titreşimle gerilme giderme işlemi sonrası parçanın akma ve kopma dayanımlarında çok büyük bir değişim beklenmemektedir [4, 25, 36, 37]. Elastisite modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Bu değer artması elastik olarak esnemenin zorlaşacağını ifade etmektedir. Elastisite modülündeki artışın nedeni, titreşim uygulaması sırasında düzensiz durumda olan atomları titreşim enerjisi absorbe ederek atomlar ile daha güçlü bağ kurması ile olabileceği öngörülmüştür. Çekme deneyi sonuçlarında test sırasında malzemenin uzama oranı da ölçülmektedir. Ortalama uzama oranları incelendiğinde titreşimle gerilme işlemi sırasında parçaların uzama oranının değişmediği, %22 olarak kaldığı görülmüştür. Numunelerin deney sonrası hasar görüntüleri Resim 4.1. ve Resim 4.2.'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Gerilme gidermesiz numunelerin çekme deneyi sonuçları

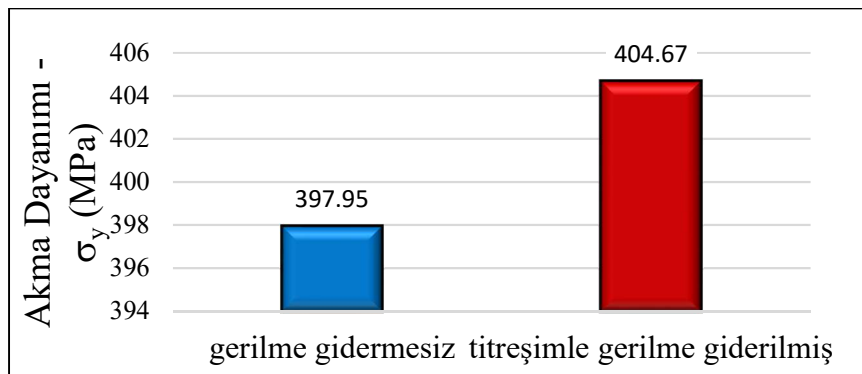
Örnek numarası	Akma dayanımı MPa	Çekme dayanımı MPa	Elastisite Modülü GPa	Uzama Oranı (%)
1	398	555	196	22.29
2	386	551	200	20.10
3	410	548	197	23.61

Çizelge 4.2. Titreşimle gerilme giderme uygulanmış numunelerin çekme deneyi sonuçları

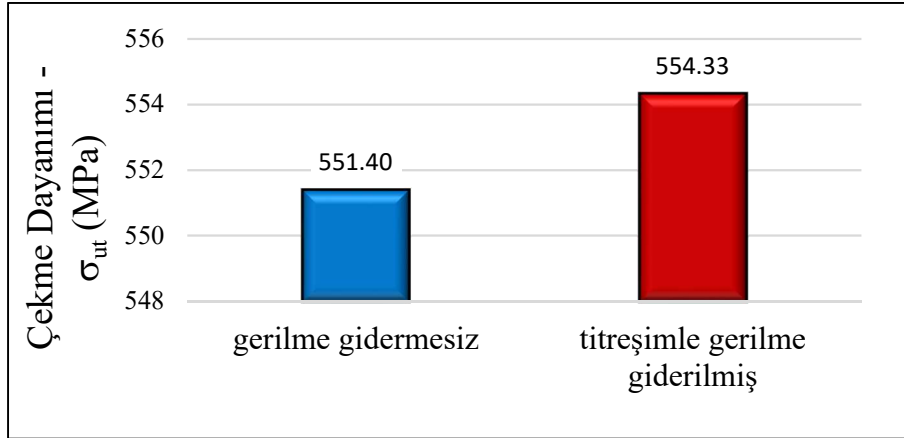
Örnek numarası	Akma dayanımı MPa	Çekme dayanımı MPa	Elastisite Modülü GPa	Uzama Oranı (%)
1	412	552	216	22.77
2	393	556	218	21.87
3	409	555	201	23.77



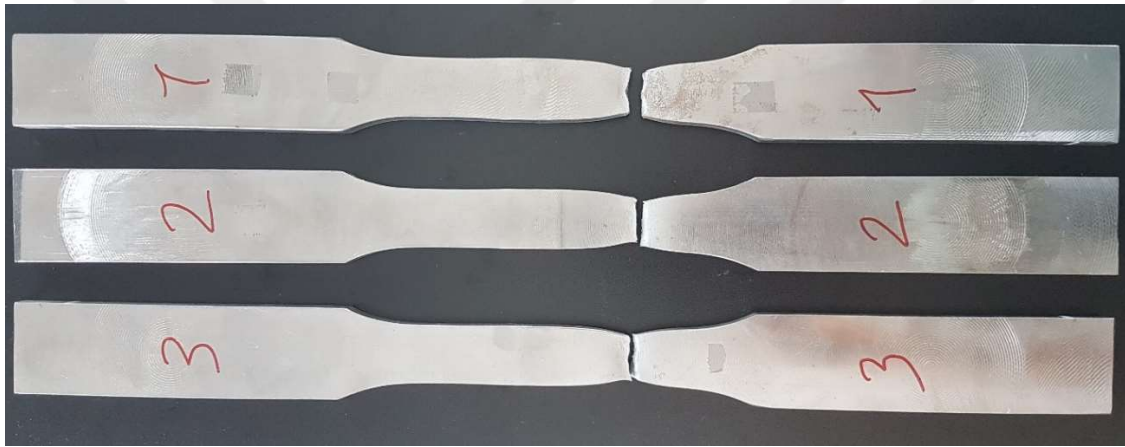
Şekil 4.1. Ortalama elastisite modülü karşılaştırması



Şekil 4.2. Ortalama akma dayanımı karşılaştırması



Şekil 4.3. Ortalama çekme dayanımı karşılaştırması



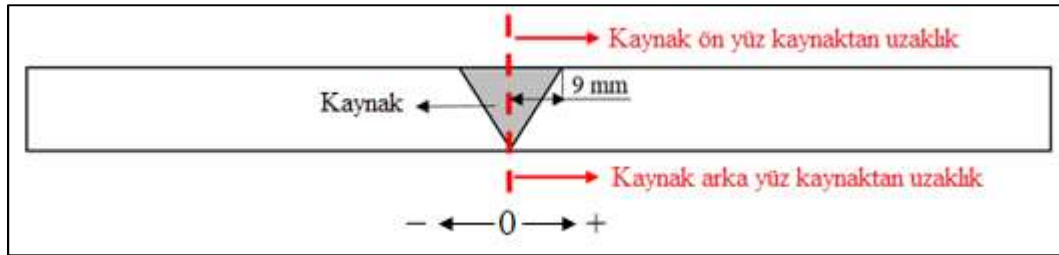
Resim 4.1. Gerilme gidermesiz numunelerin çekme deney sonucu hasar görüntüleri



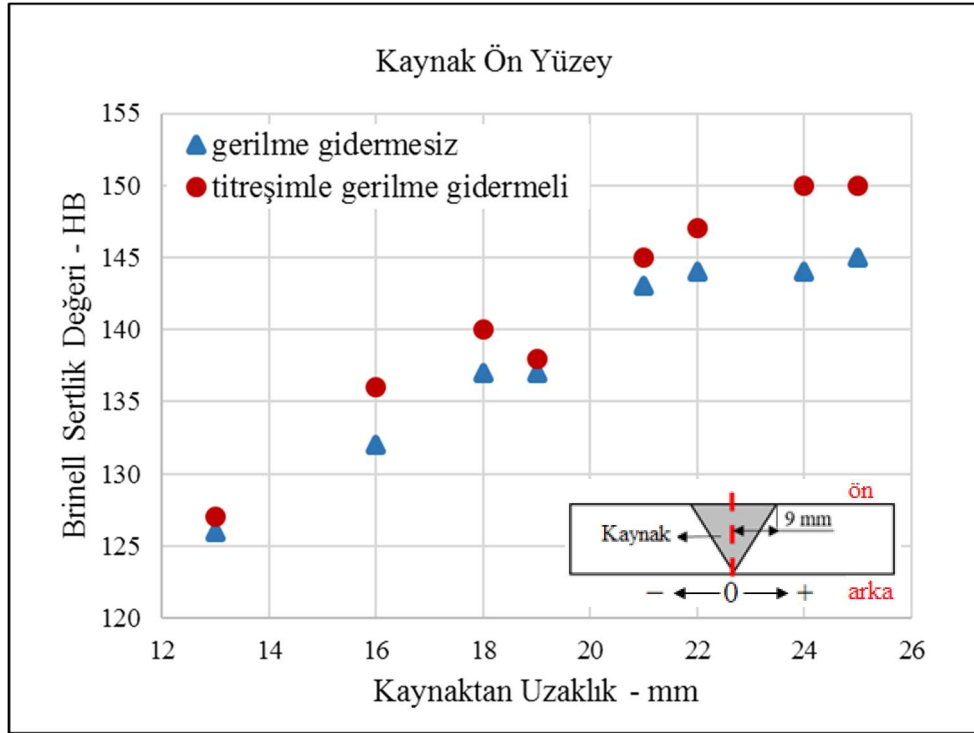
Resim 4.2. TGG numunelerin çekme deney sonucu hasar görüntüleri

İki farklı parametre için kaynaklı plakanın ön ve arka yüzünden Brinell sertlik değerleri toplanmıştır. Sertlik ölçümünün yapıldığı konum Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Şekil 4.5. kaynaklı plakanın ön yüzündeki sertlik sonuçları, Şekil 4.6.'da ise kaynaklı plakanın arka yüzündeki sertlik sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde titreşimle gerilme giderme işlemi sonucunda parçanın hem ön hem de arka yüzündeki sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir.

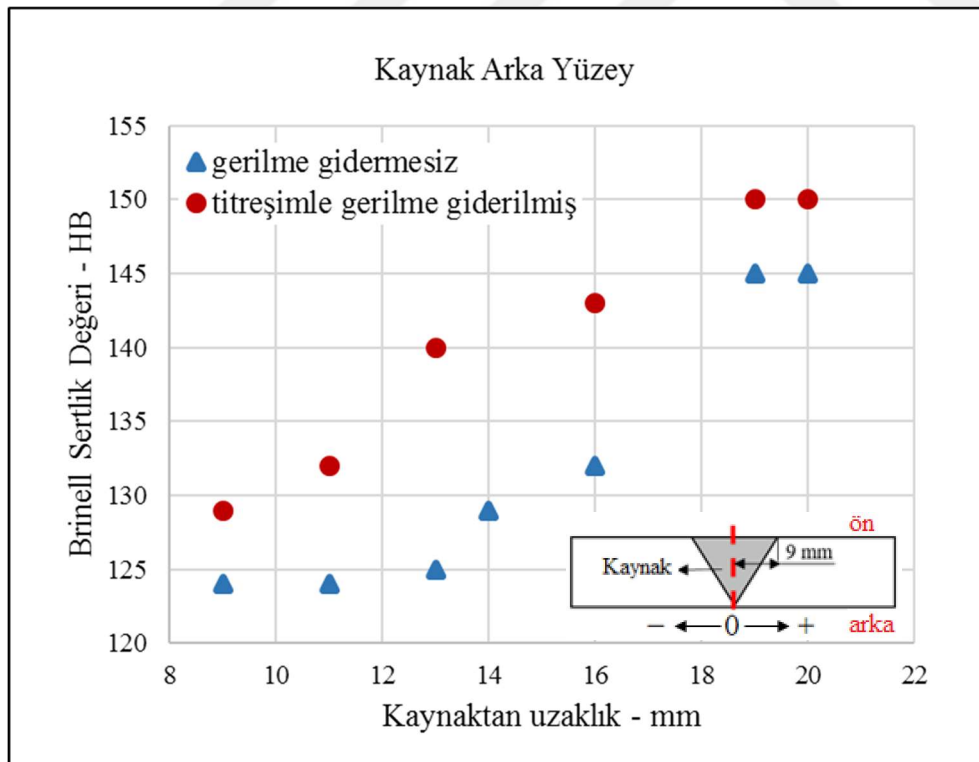
Ön kısımda, kaynak merkezinden 13 mm uzaklıkta minimum 1 HB artarken, kaynak merkezinden 24 mm uzaklıkta maksimum 6 HB değeri artmıştır. Arka kısımda, kaynaktan 9 mm uzaklıkta minimum 5 HB, 13 mm uzaklıkta 15 HB değeri artmıştır. Grafıklara genel olarak bakıldığında kaynak yakın bölgelerde sertlik değerlerindeki değişim daha az iken, kaynaktan uzak bölgelerde sertlik değerlerindeki fark daha fazla olmuştur. Malzeme üzerindeki sertlik değerleri ile malzemenin kopma değeri arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki parçanın sertlik değeri arttığında, çekme değerinin de artacağını göstermektedir. Malzeme üzerindeki sertlik değerindeki artış, kopma ve akma değerlerindeki artış ile uyushmaktadır. Titreşim uygulaması sonucunda, malzeme plastik deformasyona uğrayarak içyapıda dislokasyon yoğunluğunda artış meydana gelmektedir. Sonuç olarak lokal pekleşme meydana geldiği için yüzeyde sertlik artışı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4. Kaynaklı plaka ön ve arka yüzeyi sertlik ölçüm konumları



Şekil 4.5. Kaynaklı plaka ön yüzeyi sertlik ölçüm sonuçları

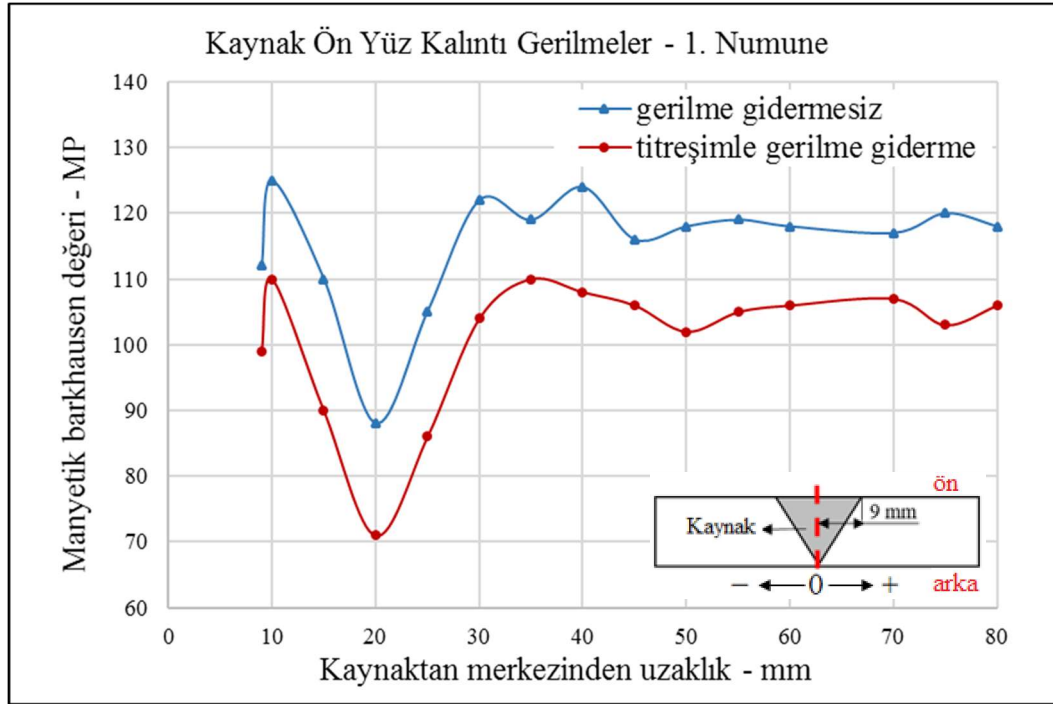


Şekil 4.6. Kaynaklı plaka arka yüzeyi sertlik ölçüm sonuçları

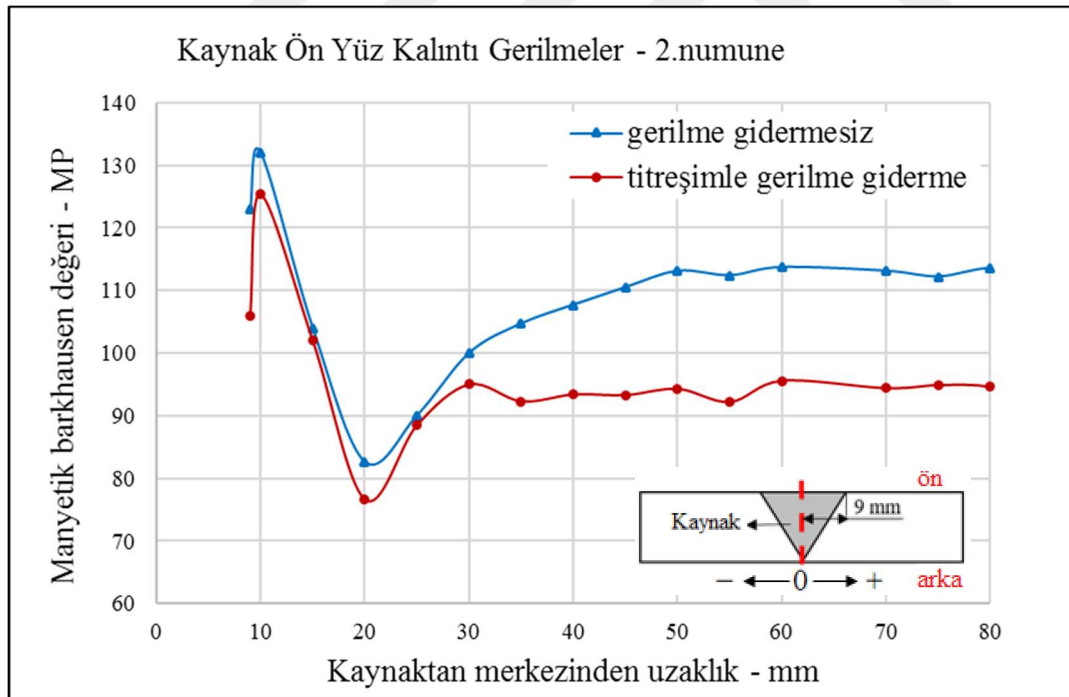
Kalıntı gerilme ölçüm değerleri, aynı şartlar altında yapılan 3 plakadan alınmış daha sonra aynı plakalara titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanmış ve aynı hat boyunca ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçümler Manyetik Barkhausen gürültüsü yöntemi boyunca toplanmıştır. Manyetik Barkhausen gürültüsü yönteminden MP cinsinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. MP cinsinden elde edilen verilerin gerilmeye çevrilmesi için, test yapılan parçaya ait korelasyon eğrisinin çıkarılması gerekmektedir. Öncelikle, ön ve arka yüz için elde edilen eğrilerin eğilimleri genel olarak incelendiğinde literatürde daha önce yapılan çalışmalarla benzerlik gösterdiği görülmektedir [29, 30, 32, 33, 37]. Titreşimle gerilme giderme uygulaması sonrasında tüm plakaların hem ön hem de arka yüzlerinde yüzdeleri farklı olarak kalıntı gerilme değerlerinde azalma belirtilmiştir. Farklı malzemelere uygulanan titreşimle gerilme işlemi sonrası, benzer ölçümlerde de kalıntı gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Kalıntı gerilmelerdeki azalma miktarı titreşimin uygulama noktası, uygulanan frekansa ve genliğe ve uygulanan malzemenin sönümleme kabiliyetine göre değişkenlik göstermektedir. TGG uygulanan numunelerde, titreşim enerjisi ile plastik deformasyon meydana gelmiş olduğu ve plastik deformasyon sonucu kalıntı gerilmelerin azaldığı düşünülmektedir.

Kaynaklı plakaların ön yüz kalıntı gerilmelerinde en fazla iyileşme birinci numunede, Şekil 4.7., elde edilmiştir. Kaynak kenarındaki maksimum çekme değeri 125 MP'den 110 MP'ye düşmüş olup %12'lik iyileşme olmuştur. Üst yüzeyde bası gerilmeleri ise 88 MP'den 70 MP'ye gerilemiş ve kaynaktan uzak bölgedeki değerler yaklaşık olarak 120 MP'den 110 MP mertebelerine azalmıştır. İkinci ve üçüncü numunelerde, Şekil 4.8. ve Şekil 4.9., numunede kaynak kenar bölgesinde, gerilme giderme işlemi sonrasında % 5'lik ve %7'lik iyileşmeler olmuştur. MP değerleri sırasıyla 132 den 125,4'e ve 137,5'den 128'e gerilemişlerdir.

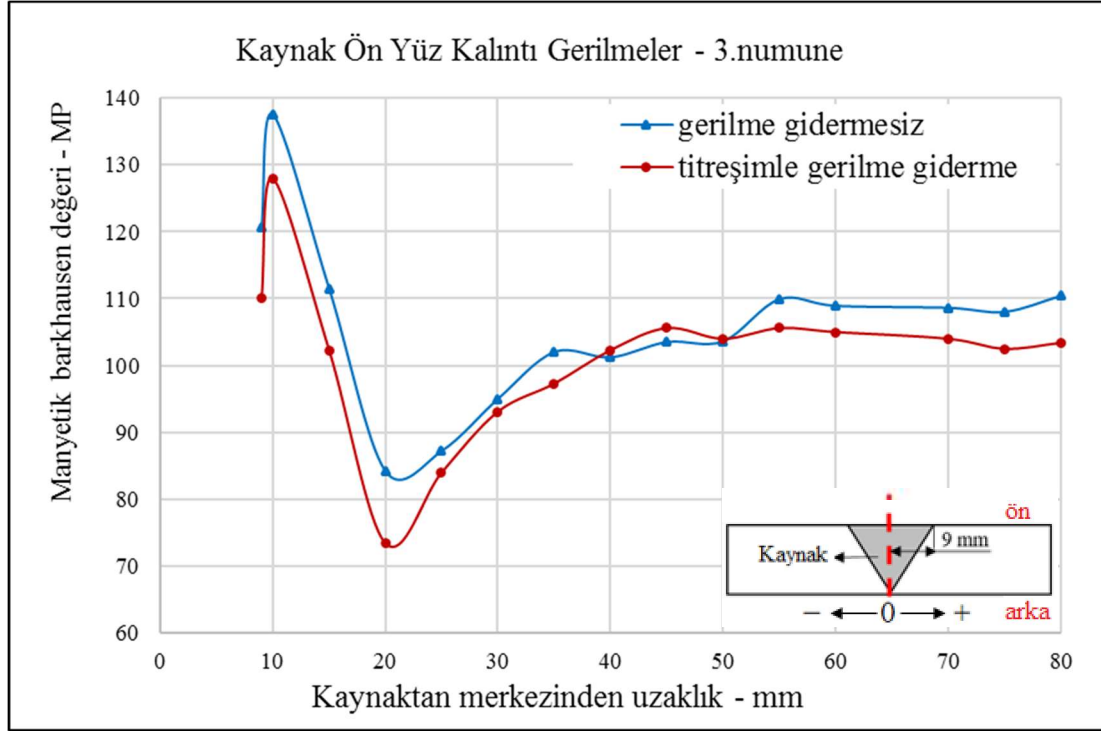
Kaynaklı plaka arka yüz kalıntı gerilme ölçümlerinde cihazın ucu değer okumaya merkezinden 5 cm geride başlayıp 5 cm ileride bitirmiştir. Eğrilerin simetrik olması beklenirken, tamamen simetrik olmadığı görülmektedir. Birinci numunede, Şekil 4.10., kaynak yakın bölgedeki MP değerlerinde maksimum %20 azalma meydana gelmiştir. İkinci numunede, Şekil 4.11., kaynak çevresi ve kaynaktan uzak bölgelerde % 9 oranında iyileşme olmuştur. Üçüncü numunede, Şekil 4.12., kaynak yakın bölgedeki MP değerleri 139'dan 120'e düşerek kalıntı gerilmelerde %13,6 düşüş olmuştur.



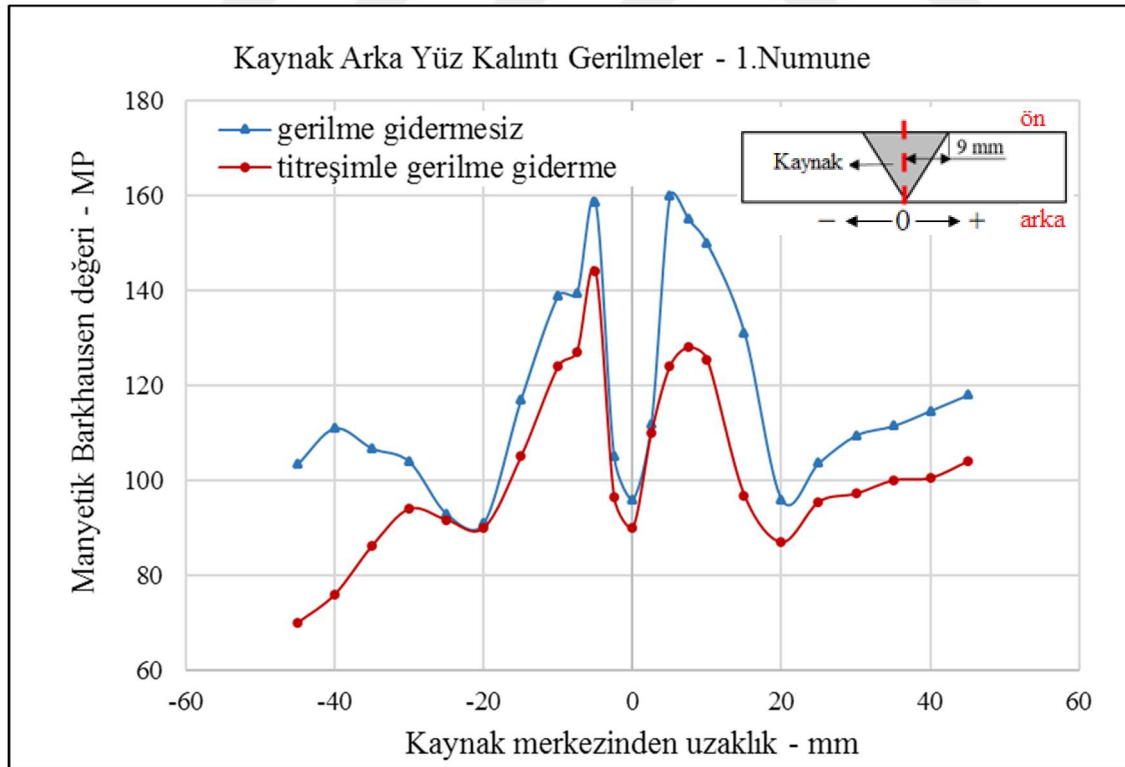
Şekil 4.7. 1. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



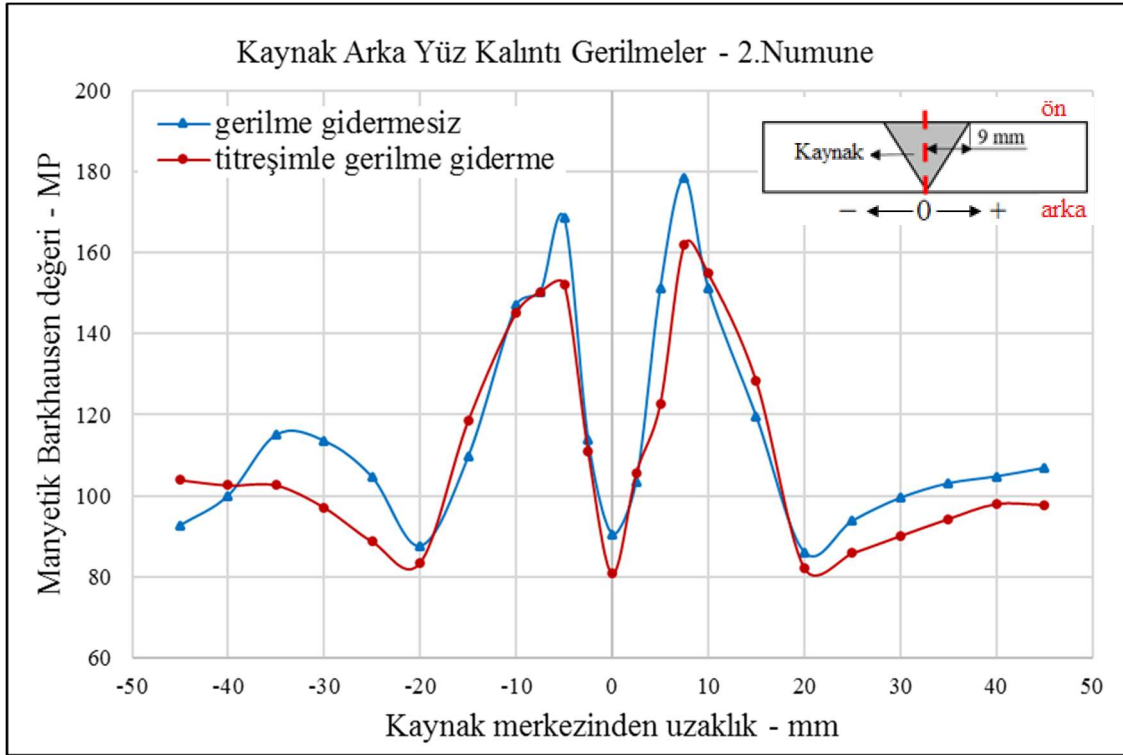
Şekil 4.8. 2. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



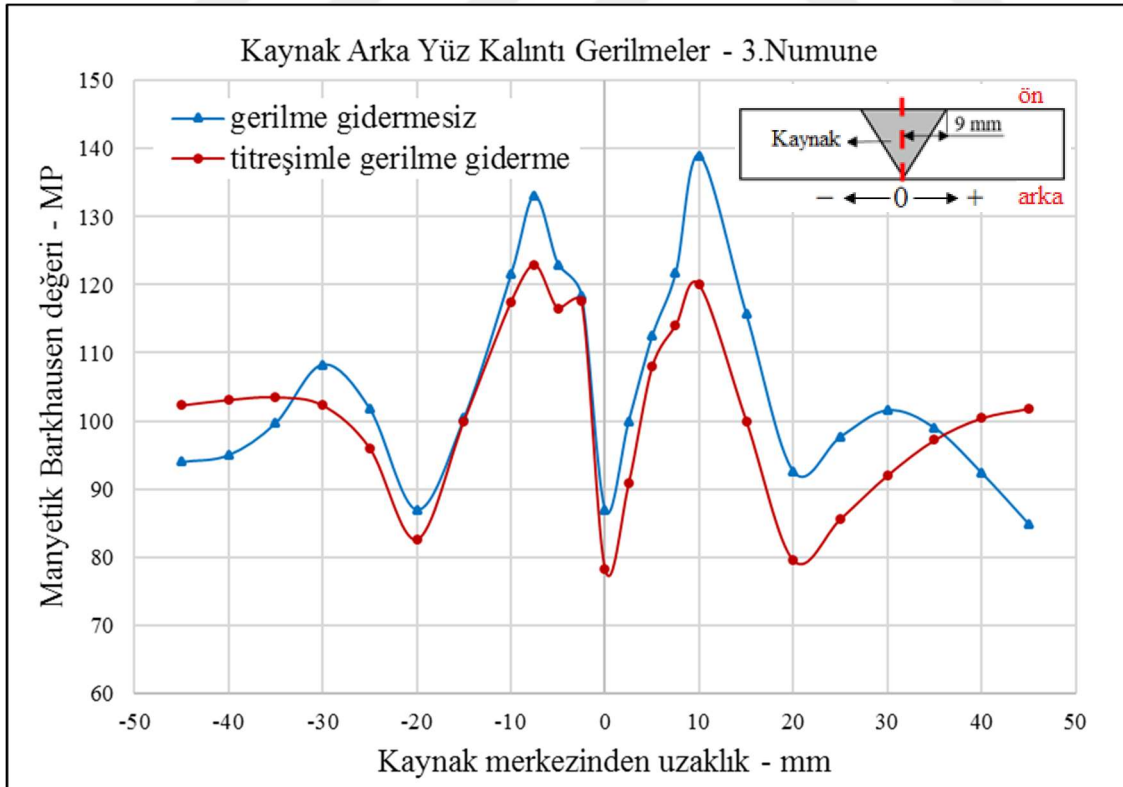
Şekil 4.9. 3. Numune - Kaynaklı plaka ön yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



Şekil 4.10. 1. Numune - kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

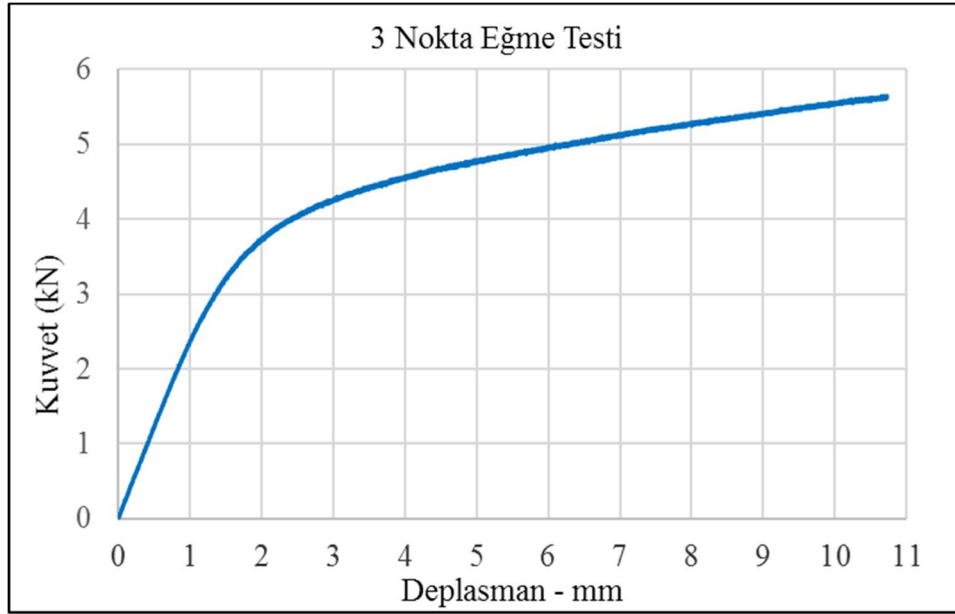


Şekil 4.11. 2. Numune - Kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları



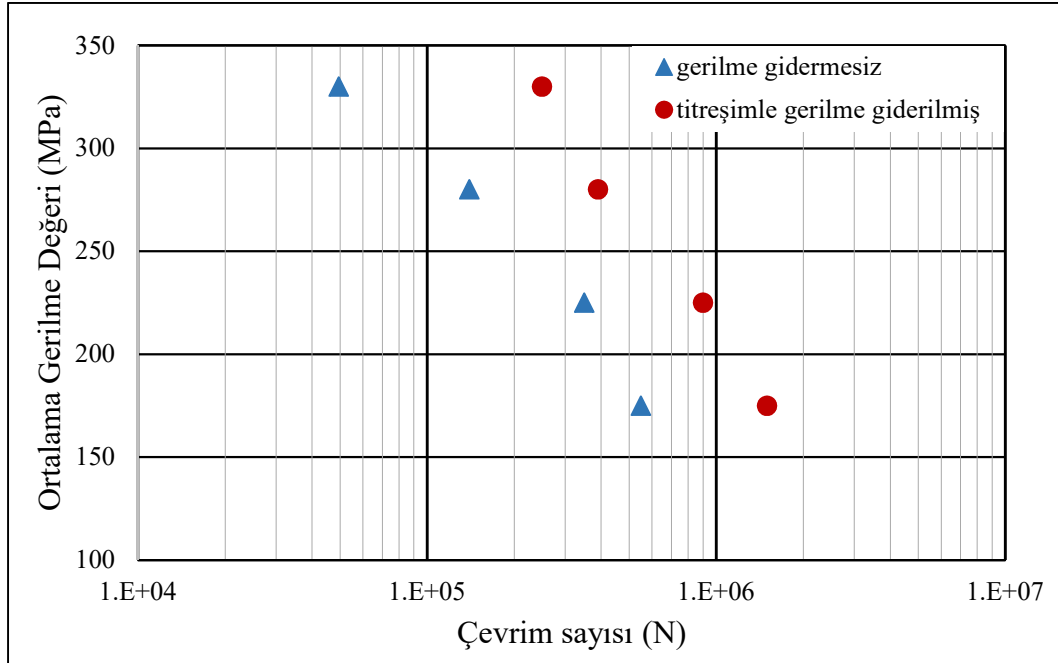
Şekil 4.12. 3. Numune - Kaynaklı plaka arka yüzeyi kalıntı gerilme ölçüm sonuçları

Titreşimle gerilme gidermenin yorulma ömrüne etkisini incelemek için öncelikle, standartlara uygun olarak üç nokta statik eğme testi yapılmıştır. Bu test ile eğme sırasında malzemenin akma noktası tespit edilmiş ve elde edilen akma noktasına göre yorulma testlerinde uygulanacak kuvvetler belirlenmiştir. Şekil 4.13.'de statik üç nokta eğme testi sonuçları incelenebilir. Statik eğme testinde akma plastik şekil değiştirmenin başladığı bölge 2.4 kN olup bu yüke karşılık gelen deplasman değeri 1 mm'dir. S355J2 çeliği sünek olduğu için test sırasında kopma yaşanmamıştır.



Şekil 4.13. Statik eğme deneyi – yük deplasman grafiği

Yorulma testleri sırasıyla 2.3, 2, 1.6 ve 1.25 kN yüklerinde, $R=0,9$ oranında ve 6 Hz. yapılmıştır. Dayanıklılık sınırı, malzemenin akma başlangıcı kabul edilmiştir. Testler sonucunda titreşimle gerilme gidermesi uygulanmış numunelerin yorulma dayanımının yaklaşık olarak 3 kat arttığı tespit edilmiştir. Gerilme gidermesiz ve titreşimle gerilme giderme uygulanmış numunelerin yorulma test sonuçları karşılaştırılması Şekil 4.14. ve Çizelge 4.3.'de görülebilir. Titreşimle gerilme giderme uygulanan numunelerin yorulma ömürlerinde görülen artışın ana nedeni aynı yük altında daha az şekil değiştirme eğiliminde olmasıdır.



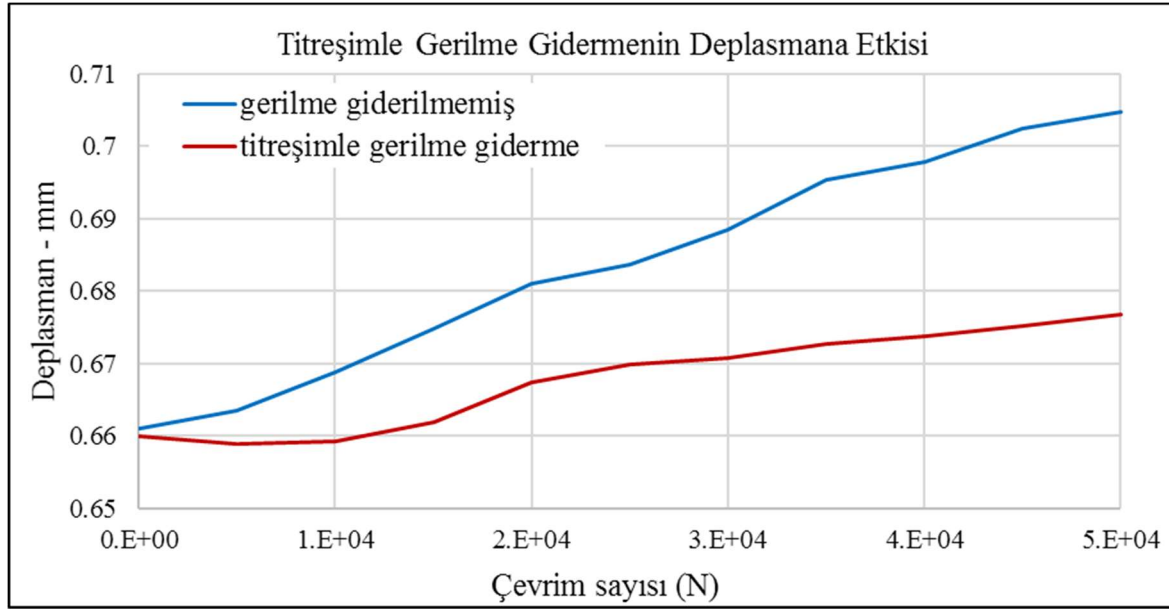
Şekil 4.14. Yorulma deneyi sonuçları

Çizelge 4.3. Yorulma deneyi nümerik sonuçları

Numune	Kuvvet	Kuvvete karşılık gerilme değeri	Gerilme gidermesiz numune	Titreşimle gerilme giderilmiş numune
No	kN	MPa	Ömür (N)	Ömür (N)
1	2.3	330	49 500	250 000
2	2	280	140 000	390 000
3	1.6	225	350 000	900 000
4	1.25	175	550 000	1 500 000

Yorulma testlerinden elde edilen artış daha önce farklı malzeme, farklı kalınlıktaki ve farklı kaynak tipleri ile yapılan çalışma sonuçları ile örtüşmektedir. Daha önce yapılan az orandaki yorulma çalışmalarında, titreşimle gerilme giderme uygulaması sonucunda yorulma ömründe artış olduğu hesaplanmıştır [4, 33, 37].

Yorulma deney sonuçları detaylıca incelenmiştir. Titreşimle gerilme giderme uygulaması sonrasında deney parçalarının deplasman verileri incelenmiştir. Şekil 4.15.'te 1.6 kN yük altında ve 50000 döngü boyunca farklı parametrelerin, yük altındaki deplasman davranışı görülmektedir. Yorulma testlerinden elde edilen deplasman grafikleri incelendiğinde, titreşimle gerilme giderme uygulanmış parçaların aynı yük altında daha az şekil değiştirme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç daha önce çekme testlerinden elde edilen elastikiyet modülündeki artış ile de örtüşmektedir.



Şekil 4.15. Titreşimle gerilme gidermenin deplasmana etkisi

5. SONUÇLAR VE ÇIKARIMLAR

- Tez çalışmaları kapsamında, 10 mm kalınlığındaki kaynaklı plakalarda kaynak sonrası kalıntı gerilmelerin azaltılması için titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanmış ve bu yöntemin S355J2 çeliği üzerindeki kalıntı gerilmelerine ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir.
- Öncelikli olarak, çekme deneyi yapılmıştır. Herhangi bir gerilme giderme işlemi uygulanmamış kaynaklı plakalarda ortalama akma dayanımı 398 MPa iken, titreşimle gerilme giderme işlemi uygulanan plakaların ortalama akma dayanımı 404 MPa'a yükselmiştir. Çekme dayanımı 551 MPa'dan 554 MPa'a yükselmiştir. Elastisite modülündeki artış oranı ise %7,1 olup, ortalama değerler 197 GPa'dan 211 GPa'a yükselmiştir.
- Titreşimle gerilme giderme işlemi sonrası kaynaklı plaka üzerinden Brinell sertlik değerleri toplanmıştır. Titreşimle gerilme giderme işlemi sonucunda parçanın hem ön hem de arka yüzündeki sertlik değerleri artmıştır. Malzeme üzerindeki sertlik değerleri ile malzemenin çekme değeri arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki parçanın sertlik değeri arttığında, çekme değerinin de artacağını göstermektedir. Malzeme üzerindeki sertlik değerindeki artış, kopma ve akma değerlerindeki artış ile uyusmaktadır.
- Titreşimle gerilme giderme uygulaması sonrasında tüm plakaların hem ön hem de arka yüzlerinde yüzdeleri farklı olarak kalıntı gerilme değerlerinde azalma ölçülmüştür. Kalıntı gerilmelerdeki azalma miktarı titreşimin uygulama noktası, uygulanan frekansa ve genliğe ve uygulanan malzemenin sönümleme kabiliyetine göre değişkenlik göstermektedir.
- Titreşimle gerilme gidermenin yorulma ömrüne etkisini incelemek için öncelikle, standartlara uygun olarak üç nokta statik eğme testi yapılmıştır. Bu test ile yorulma testlerinde uygulanacak kuvvetler belirlenmiştir.
- Gerilme gidermesiz numune ve titreşimle gerilme giderilmiş numunelerin yorulma testleri 4 farklı yükleme durumunda yapılmıştır. Titreşimle gerilme giderme uygulaması

sonucunda, malzemenin mekanik özelliklerinde artış ve kalıntı gerilmelerde azalma meydana gelmiştir. Sonuç olarak, titreşimle gerilme gidermesi uygulanmış numunelerin yorulma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Yorulma testlerinden elde edilen deplasman grafikleri incelendiğinde, titreşimle gerilme giderme uygulanmış parçaların aynı yük altında daha az şekil değiştirme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

- Bu tez çalışmasında titreşimle gerilme giderme uygulamasının kaynaklı yapılarda kaynak sonrası kalıntı giderme ve ömür arttırıcı yöntem olarak uygunluğu araştırılmıştır. Gerilme giderme işlemlerinde kaynaklı bağlantılarda en çok tercih edilen yöntem ısıl işlemdir. Bu yöntem, ısıl işleme göre maliyet, zaman, parçanın boyut ve kalınlık kısıtlamalarını ortadan kaldırması, işlem sırasında mekanik özellikleri iyileştirmesi gibi avantajlar sağlamanın yanında çevreyi de kirletmemektedir.
- Titreşimle gerilme gidermenin ısıl işleme göre dezavantajları yüksek dayanımlı malzemelere uygulandığında etkin sonuç vermemesi ve işlemin matematiksel modellemesinin tam bulunamaması sebebiyle sistemin en verimli olduğu uygulama şartlarının belirlenmesi için çok fazla deney yapılması gerekliliğidir.
- Gelecek çalışmalarda öncelikli olarak manyetik barkhausen gürültüsü yönteminden elde edilen MP değerlerini gerilme değerlerine çevirebilmek için malzemeye ait korelasyon eğrinin oluşturulması planlanmaktadır. Daha sonra titreşim uygulamalarında daha iyi sonuç elde edebilmek için, uygulanan parametrelerin optimizasyonu konularında çalışılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Anık S. ve Tülbentçi K. (1991). *Gazaltı Kaynak Tekniği*, İstanbul: Gedik Kaynak Teknik Yayınları.
2. Johnson, J. (1998) *Fatigue Life Improvement Techniques for Welds*, Alabama, ABD: Process Barron Teknik Yayınları.
3. Eryürek, B. (2007), *Gazaltı Ark Kaynağı* (İkinci Baskı). Türkiye: Askaynak Teknik Yayınları.
4. Topalak, E. (2011). *Kaynaklı konstrüksiyonlarda titreşimle gerilme giderme ve uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
5. Çevik, B., zer, A. ve zatalbaş, Y. (2012). *Kaynak dikişinde oluşan makaslama gerilmelerine kalıntı gerilmelerin etkisi*, 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı, Ankara, 473-479.
6. Yelbay, H. İ. (2009). *Determination of residual stress state in steel weldments*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
7. Çevik, B. (2009). *Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerine kalici gerilmelerin etkisinin deneysel olarak belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
8. zer, A. (2010). *ngerilme tekniği ile elik kiriş üretim, eğilme davranışı ve kalıntı gerilmelerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
9. Vural, M. (2003). *Materials and processes in manufacturing*. (9nd ed.). İstanbul: Birsen Yayınevi.
10. Benli, S. (2004). *Kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmelerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
11. Vural, U. (2009). *Kaynaklı imalat sonrası oluşan distorsiyonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
12. Güleç, ř. ve Aran, A. (1985). *Malzeme Bilgisi*, Gebze: Tübitak Yayınları.
13. Gurney, T. R. (1968) *Fatigue of welded structures*, Cambridge: Cambridge University Press.

14. Broadman B. (1990). *Fatigue Resistance of Steels*, American Society of Materials International.
15. Lu J. (1996). *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental Mechanics.
16. Dilmeç, M. ve Halkacı S. (2008). Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 49(579), 20-27.
17. Yelbay, H. İ. (2008). *Tahribatsız yöntemlerle kalıntı gerilim ölçümündeki gelişmeler*, 3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition, İstanbul.
18. Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., and Sreeshylam, P. (2005). Non Destructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Noise Technique, *Experimental Techniques*, 17-21.
19. Erian, G. (2012). *Non-destructive evaluation of residual stresses in the multi-pass steel weldments*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
20. Dias, A. R. P., Nunesa, R.M., Lima, T. R. S., and Clarke, T. G. R. (2016). Evaluation of the Residual Stress State of 42crmo4 Steel Sheets in a Production Line, *Materials Research*, 153-157.
21. Kirkhope, K.J., Bell, R., Caron, L., Basu, R.I., and Ma, K.T. (1999). Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques, *Marine Structures* 12, 447-474.
22. Ersin, R. C. (2009). *Isı girdisinin ve kaynak sonrası gerilim giderme ısıtılmasının mekanik özelliklere etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
23. Şen, Y. (2006). *Talaşlı imalat esnasında parçalara yüklenen artık gerilmelerin ısıtılma sonrası etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
24. Adams, C. M., Berry, T. J., and Kluba, B. B. (2005). Productive Applications Of Mechanical Vibrations, *American Society of Materials*, 52.
25. İnternet: <http://www.meta-lax.com/Home/Literature/literature.html>, Son Erişim Tarihi: 15.12.2017.
26. Hebel, A. G. (2004). Vibrational Conditioning Of Metals, Bonal Technologies, *Heat Treating Progress Magazine*, 2, 148-158.

27. Kwofie, S. (2009). Plasticity Model For Simulation, Description And Evaluation Of Vibratory Stress Relief, *Materials Science and Engineering*, A516 154-161.
28. Yang, Y. P., Jung G., and Yancey R. (2005). Finite Element Modeling Of Vibration Stress Relief After Welding, *American Society Of Materials*.
29. Sun, M.C., Sun, Y.H., and Wang, R.K. (2003). The Vibratory Stress Relief Of A Marine Shafting Of 35# Bar Steel, *Materials Letters* 58, 299-303.
30. Sun, M.C., Sun, Y.H., and Wang, R.K. (2003). Vibratory Stress Relieving Of Welded Sheet Steels Of Low Alloy High Strength Steel, *Material Letters* 58, 1396-1399.
31. Rao, D., Ge, J., and Chen, L. (2004). Vibratory Stress Relief In Manufacturing The Rails Of A Maglev System, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 388-391.
32. Rao, D., Wang, D., Chen, L., B, and Ni, C. (2007). The Effectiveness Evaluation Of 314L Stainless Steel Vibratory Stress Relief By Dynamic Stress, *International Journal of Fatigue*, 192-196.
33. Munsı, A. S. M. Y., Waddell A. J., and Walker, C.A. (2001). The Influence Of Vibratory Treatment On The Fatigue Life Of Welds: A Comparasion With Thermal Stress Relief, *Journal of Strain Analysis*, 37-4.
34. İnternet:https://www.erdemironline.com/Extranet/static/tr/static/UrunKataloguTR_26122017.pdf, Son Erişim Tarihi: 15.12.2017.
35. Mehrabadi, S.J., Azizmoradi, M., and Emami, M. M. (2012) Stress Relief and Material Properties Improvement Through Vibration vs.. Common Thermal Method, *Journal of Solid Mechanics*, 4(2), 170-176.
36. Jurius, Valiulis, (2008). *Reduce of Material Residual Stresses Using Vibration Energy*, Proceedings of the International Conference Vibroengineering.
37. Shankar, S. (1982). *Vibratory stress relief of mild steel weldments*, Doktora Tezi, Oregon Üniversitesi, ABD.
38. Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS 282 EN 910 Metalik malzemelerde kaynaklar üzerinde tahribatlı muayeneler – Eğme deneyleri*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
39. Türk Standartları Enstitüsü. (1996). *TS 287 EN 895 Metalik malzemelerde kaynaklar üzerinde tahribatlı deneyler-Enine çekme deneyi*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

40. International Organization for Standardization. (2001). *ISO 14345 Fatigue testing of welded components*, İsviçre: International Organization for Standardization.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :KAÇAR, Sinem
 Uyruğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :03.08.1990, Ankara
 Medeni hali :Evli
 E-mail :sinem.yesilce@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Makina Müh.	Devam ediyor
Lisans	Selçuk Üniversitesi/ Makine Müh.	2012
Lisans (Çift Anadal)	Selçuk Üniversitesi/ İşletme Bölümü	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	HİDROMEK A.Ş.	Analiz Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kaçar, S. and Yılmaz, O. (2017). *Investigation of the effect of vibration stress relief method on fatigue life of welded joints working under heavy and variable loads*, International Conference and Manufacturing Technologies, Karabük, 63-66.



GAZİ GELECEKTİR..